

# Projet de hadronthérapie à Lyon

## Lignes de faisceau

B. Launé\*, F. Méot†, A. Tkatchenko‡

4 juillet 2001

### Résumé

Ce rapport décrit les lignes de faisceau du projet de hadronthérapie Rhône-Alpes, depuis la région d'extraction dans le synchrotron jusqu'aux chambres d'irradiation.

ext-2001-042  
10/07/2001



*CEA DSM DAPNIA/SEA-01-10 & CNRS IN2P3 IPNO-01-07*

---

\*CNRS IN2P3/IPNO, 91406 Orsay cedex (laune@ipno.in2p3.fr)

†CEA, DSM/DAPNIA/SEA, 91191 Saclay (fmeot@cea.fr)

‡CNRS IN2P3/IPNO, 91406 Orsay cedex (tkatchen@ipno.in2p3.fr)

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1 Description générale</b>	<b>3</b>
<b>2 Ligne d'extraction</b>	<b>6</b>
2.1 Version A : déviation de 22.5 degrés, beam-stop séparé . . . . .	6
2.2 Version B : déviation de 45 degrés, beam-stop intégré . . . . .	10
<b>3 Module de déviation 90 degrés</b>	<b>15</b>
3.1 Utilisation en déviation horizontale . . . . .	15
3.2 Utilisation en déviation verticale . . . . .	20
<b>4 Module FODO</b>	<b>24</b>
<b>5 Ligne faisceau verticale</b>	<b>25</b>
<b>6 Ensemble extraction-desserte chambre 1</b>	<b>29</b>
<b>7 Ensemble extraction-ligne faisceau verticale</b>	<b>31</b>
<b>8 Arrêt faisceau</b>	<b>33</b>
<b>9 Zone utile dans les éléments optiques</b>	<b>34</b>
<b>Annexes</b>	<b>36</b>
<b>A Fichiers optiques</b>	<b>36</b>
A.1 Ligne d'extraction, version A . . . . .	36
A.2 Ligne d'extraction, version B . . . . .	36
A.3 Module de déviation 90 degrés, horizontal . . . . .	38
A.4 Module FODO . . . . .	38
A.5 Ligne faisceau verticale . . . . .	39
<b>B Scans des fonctions optiques</b>	<b>40</b>
B.1 Ligne d'extraction, version B - 45 degrés . . . . .	40
B.2 Module de déviation 90 degrés, horizontal . . . . .	41
<b>Références</b>	<b>42</b>

# Introduction

L'étude présente porte sur la géométrie et l'optique des ligne d'extraction du synchrotron, ligne de distribution et lignes de desserte des chambres d'irradiation du projet de hadronthérapie Rhône-Alpes. Ces lignes de faisceau sont disposées selon une structure en "arête de poisson" schématisée en Fig. 1, elles transportent les faisceaux de proton ou carbone extraits de l'anneau PIMMS, depuis l'entrée du septum électrostatique situé environ 11 m en amont dans l'anneau, jusqu'aux plans images situés au droit des cibles à irradier dans les salles médicales (respectivement "Chambre 1", "Chambre 2", "Faisceau vertical" sur la Fig. 1).

Cette étude n'a pas pour but de figer options ou paramètres, ni de décrire le projet de façon détaillée, mais de fournir des éléments nécessaires au chiffrage du coût des lignes faisceau. L'ensemble cohérent ainsi élaboré permet cependant dans le même temps de démontrer la faisabilité de l'implantation recherchée et de préciser les ordres de grandeur des paramètres-clés de l'optique.

## 1 Description générale

La conception de ces lignes faisceau est basée sur l'utilisation de modules indépendants, achromatiques, aisément réglables dans la gamme de diamètres recherchée au niveau de la cible, soit  $\phi : 4 \rightarrow 10$  mm. On se réfère au synoptique donné en Fig. 1. On verra que les quelques 150 mètres de lignes décrits se réduisent ainsi à différents agencements de trois modules de base.

Jusqu'au premier quadrupôle de la ligne d'extraction (QFA), l'implantation est celle du projet PIMMS [2, PartII,Tab.5.3,p.120 & Fig.5.2,p.122] ; en particulier, l'axe d'extraction proprement dit se dissocie de l'orbite de référence dans le synchrotron au droit du septum électrostatique, et la ligne d'extraction quitte l'anneau, au niveau du second septum magnétique, sous une incidence de 200 mrad ; en outre pour des raisons d'encombrement la distance de 3.3 m du second septum magnétique à QFA ne peut être réduite.

En aval de QFA les contraintes sont les suivantes :

1. *Schéma général d'implantation*, guidé par l'agencement général du bâtiment [1, Annexe 1] et prenant en compte diverses contraintes supplémentaires :
2. *passage véhicules* de longueur 3.8 m (comme dans PIMMS) situé entre QFA et la première déviation vers les aires (DIP),
3. *prévoir l'installation d'un beam-stop*
  - soit dans une section libre de 6 m réservée à cet effet en aval de DIP [2, PartII, Fig.5.6,p.126],
  - soit combiné avec la déviation DIP elle-même,
4. prévoir en DIP une déviation de
  - ou bien 22.5 degrés (un seul dipôle)
  - ou bien 45 degrés (deux dipôles de 22.5 degrés).
5. *Fonctions optiques en début de ligne* (entrée du septum électrostatique situé dans l'anneau) déterminées
  - pour ce qui concerne le plan horizontal par les conditions de faisceau créées par l'extraction lente ,  $\sqrt{\beta_x \epsilon_x / \pi} =$  demi-largeur du faisceau extrait = 5 mm,  $\epsilon_x / \pi = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\beta_x = 125$  m,  $\alpha_x = 0$ ,

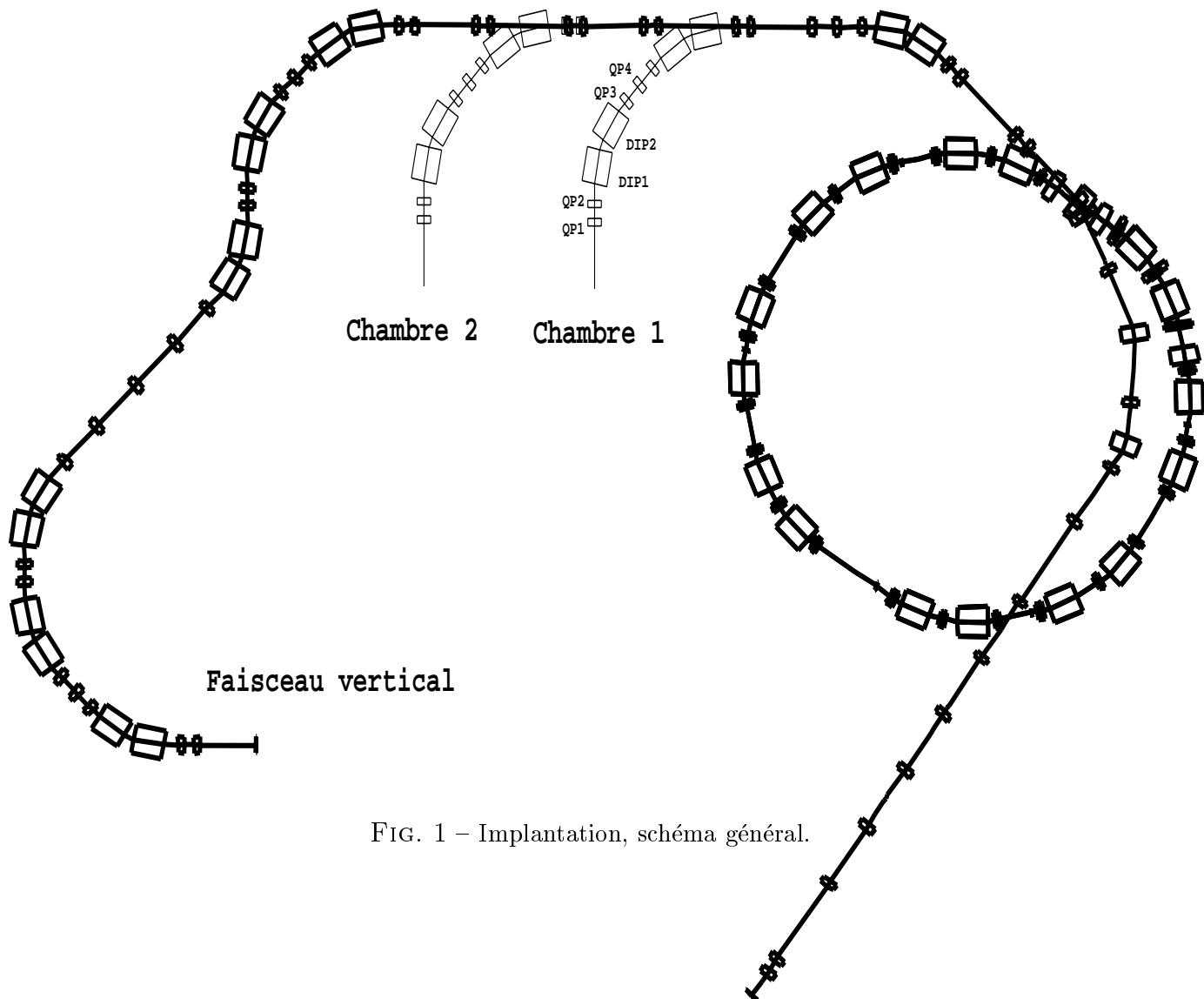


FIG. 1 – Implantation, schéma général.

- avec en particulier concernant la fonction de dispersion,  $D_x = -1.942$  m,  $D'_x = 0.025$  rad [2, PartII,Tab.5.1,p.118],
  - pour ce qui concerne le plan vertical par les paramètres du faisceau stocké à savoir, fonctions optiques qui sont celles de l’anneau au droit de l’entrée du septum électrostatique d’extraction, indépendantes de l’énergie d’extraction<sup>1</sup>,  $\beta_z = 6.523$  m,  $\alpha_z = -0.1708$  [2, PartII,Tab.5.2,p.119], valeurs d’émittances  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad à l’énergie la plus basse (proton 60 MeV et carbone 120 MeV),  $\epsilon_z/\pi = 3.34 \cdot 10^{-6}$  m.rad à l’énergie la plus élevée (proton 250 MeV).
6. *Fonctions optiques en aval de l’extraction* (i.e., aux points notés “Chambre 1”, “Chambre 2”, “Faisceau vertical” en Fig. 1), comme suit :
- divergence du faisceau nulle au patient soit,  $\alpha_x = \alpha_z \equiv 0$ ,
  - diamètre du faisceau au patient librement ajustable dans l’intervalle [4 mm,10 mm], ce qui impose une gamme de fonctions betatron  $\beta_x : 20 \rightarrow 125$  m,  $\beta_z : 0.64 \rightarrow 4$  m, corrélées,
  - force des quads inférieure à  $3 \text{ m}^{-2}$  soit, gradient maximal de 20 T/m à la rigidité la plus élevée  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$ .

---

<sup>1</sup>Remarque : le document [2, PartII,p.165] prend  $\beta_z = 6.477$  m,  $\alpha_z = -0.0814$

## 2 Ligne d'extraction

### 2.1 Version A : déviation de 22.5 degrés, beam-stop séparé

Le synoptique en est donné en Fig. 2.

On réserve les 3 quadrupôles QFA-QFC au seul réglage de la dispersion (i.e.,  $D_x$  et  $D'_x$  nulles en aval de DIP). Le réglage des fonctions  $\beta_{x,z}, \alpha_{x,z}$  s'obtient ensuite indépendamment au moyen des 4 quadrupôles QF1-QF4.

La Fig. 3 montre la fonction de dispersion dans la section chromatique, qui se termine au droit de la sortie de DIP. Le "passage véhicules" de longueur 3.8 m se trouve entre les quadrupôles QFB et QFC. La section libre qui précède QFA est incompressible.

Les Figs. 4, 5 donnent les fonctions optiques et enveloppes pour les réglages extrêmes en extrémité aval (sortie de QF4), respectivement  $\beta_x = 20$  m/ $\beta_z = 0.64$  m et  $\beta_x = 125$  m/ $\beta_z = 4$  m, réglages qui assurent des faisceaux ronds de diamètres respectifs environ 4 mm et 10 mm en QF4. La section libre de longueur 6 m destinée à l'implantation du beam-stop est placée entre QF2 et QF3.

Le Tableau 1 donne les caractéristiques des quadrupôles le long de la ligne pour ces deux types de réglages. Sauf pour QF3 qui atteint  $3.5$  m<sup>-2</sup> (22 T/m), la force des quadrupôles est inférieure à  $3$  m<sup>-2</sup>,  $\forall \phi : 4 \rightarrow 10$  mm, et le gradient est donc inférieur à 20 T/m pour la rigidité  $B\rho = 6.35$  T.m atteinte à haute énergie. Les maxima d'enveloppes s'entendent en rayon, hors-tout, et sont calculés pour  $\epsilon_x/\pi = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\delta p/p = 1.1 \cdot 10^{-3}$ , pour l'étendue de la gamme de diamètres à la cible  $\phi : 4 \rightarrow 10$  mm.

TAB. 1 – Ligne d'extraction, version A - 22.5 degrés. Caractéristiques des éléments optiques pour la gamme de diamètres images (en fin de ligne)  $\phi : 4 \rightarrow 10$  mm ; L=longueur,  $\hat{X}, \hat{Z}$  = maximum d'enveloppe,  $B_{p\hat{o}le}$  correspond à  $B\rho = 6.35$  T.m et dans les quadrupôles est donné pour un rayon au pôle de 40 mm.

	L m	Force crête $m^{-2}, m^{-1}$	$\hat{X}, \hat{Z}$ $10^{-3}$ m	$\hat{B}_{p\hat{o}le}$ T
QFA	0.35	1.358	8	0.35
QFB	0.35	-1.662	13	0.42
QFC	0.35	-0.781	4	0.2
DIP	1.661 (arc)	0.236423	8 <sup>(a)</sup>	1.5
QF1	0.35	2.200	9	0.56
QF2	0.35	-2.438	16	0.62
QF3	0.35	-3.472	11	0.89
QF4	0.35	2.670	4	0.69

<sup>(a)</sup> Maximum en Z

Le fichier optique utilisé pour ces calculs est donné en Annexe A.1 page 36.

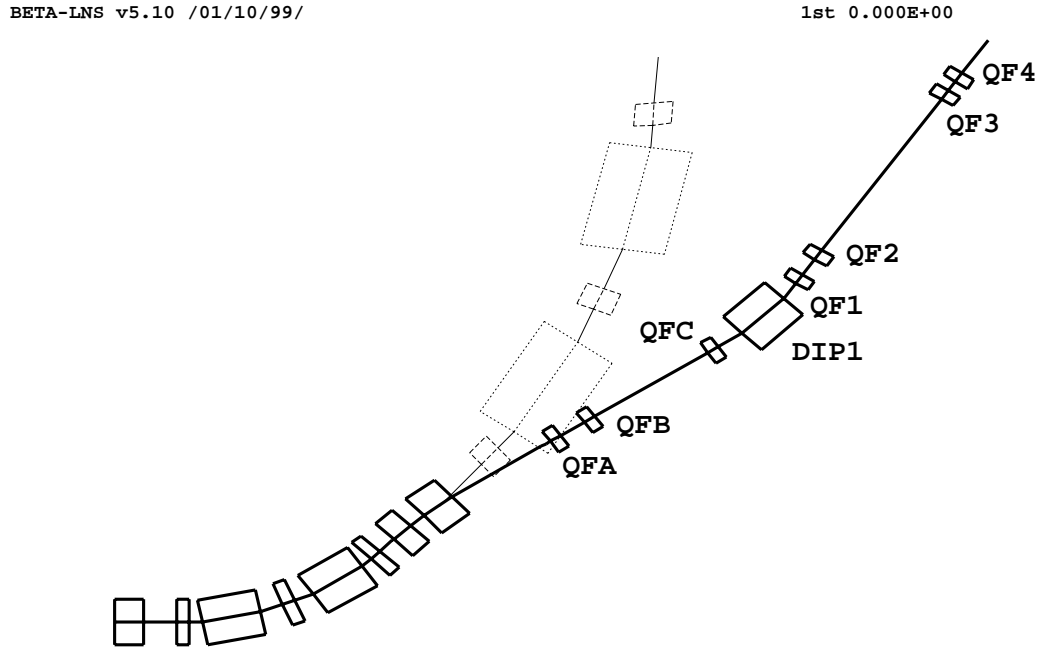


FIG. 2 – Version A - 22.5 degrés. Synoptique de la section amont de la ligne d'extraction. Longueur 22.191 m depuis le septum électrostatique.

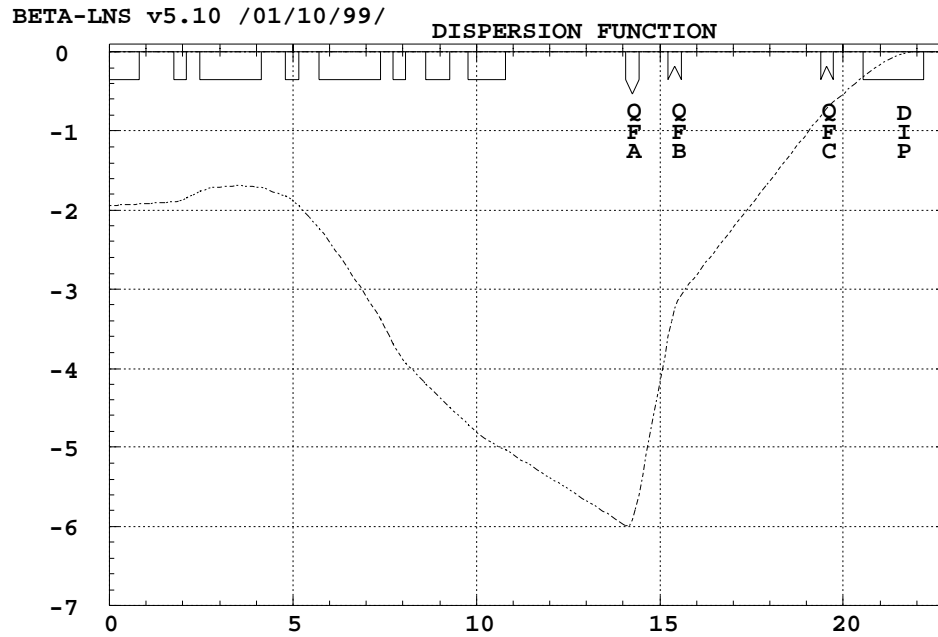


FIG. 3 – Version A - 22.5 degrés. Fonction de dispersion  $D_x(s)$  dans la partie amont de la ligne d'extraction.





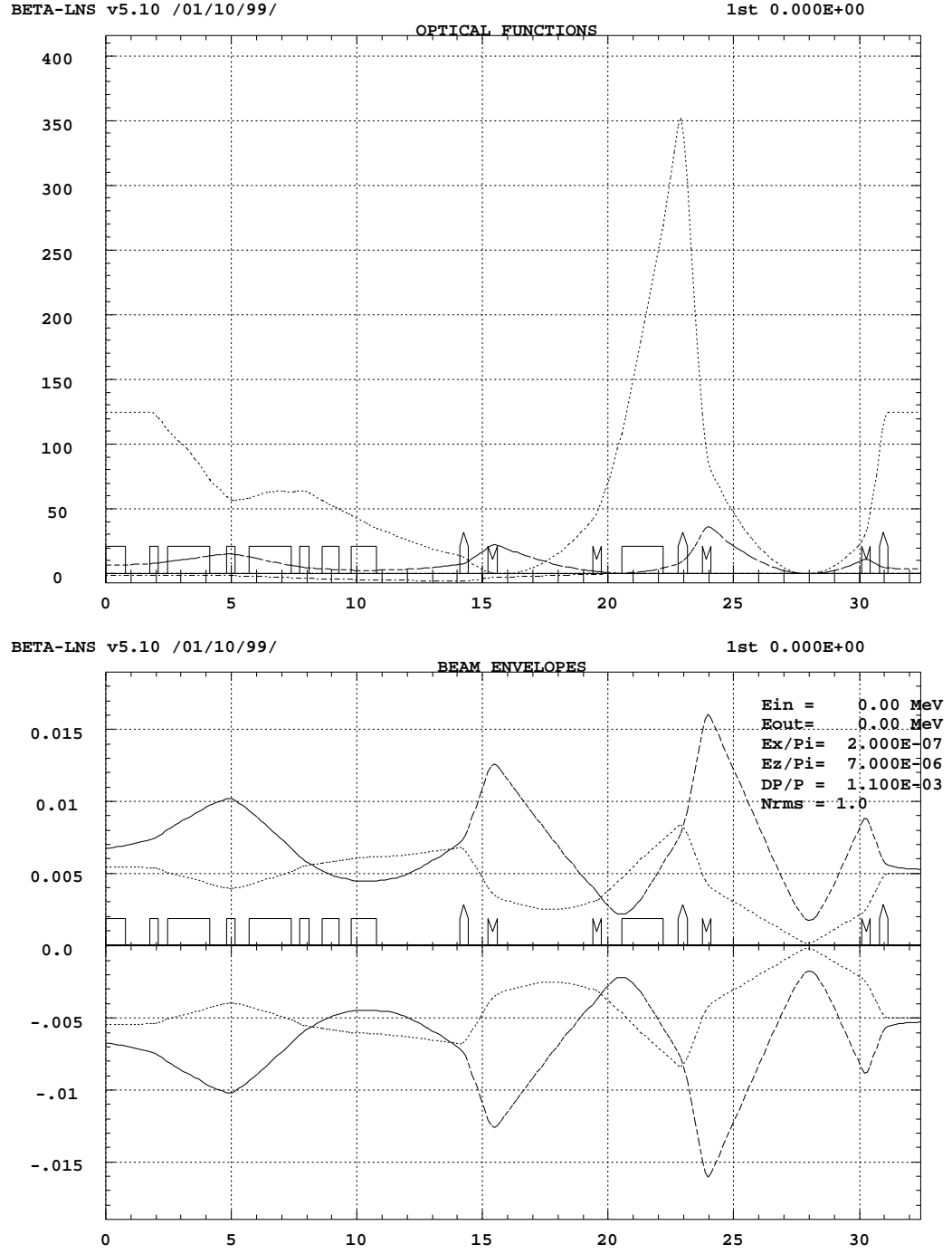


FIG. 5 – Version A - 22.5 degrés. Fonctions optiques (en haut) et enveloppes (bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 125$  m– $\beta_z = 4$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 10 mm au droit du dernier quadrupôle.

## 2.2 Version B : déviation de 45 degrés, beam-stop intégré

Le synoptique de la ligne est donné en Fig. 6. Dans cette version il est prévu d'intégrer le beam-stop dans la déviation DIP1-DIP2. En outre celle-ci est maintenant de 45 degrés.

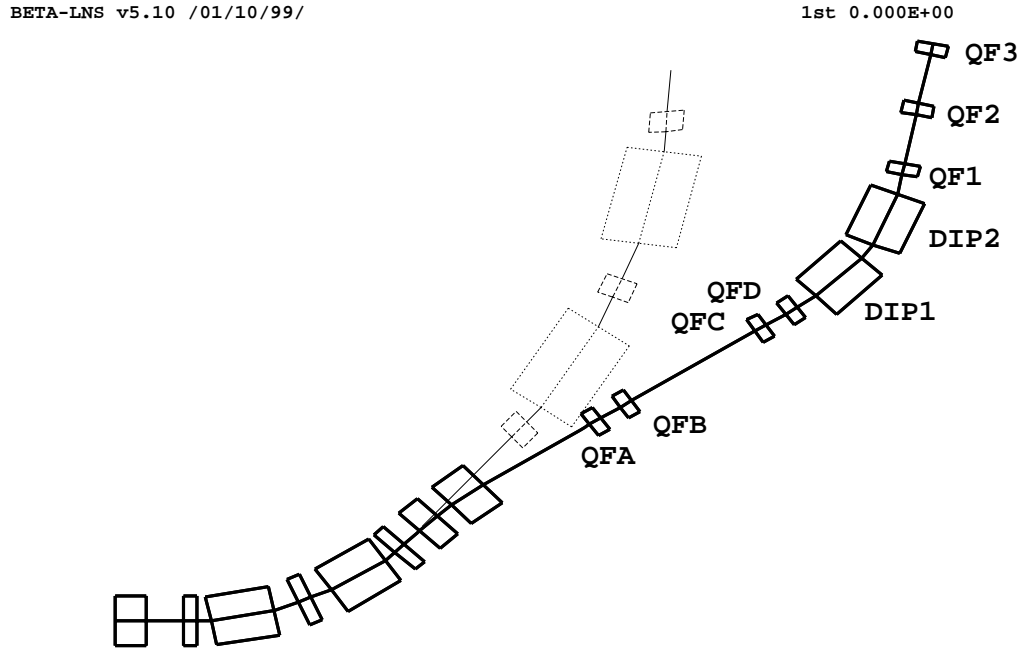


FIG. 6 – Version B - 45 degrés. Synoptique de la section amont de la ligne d'extraction. Longueur 24.902 m depuis le septum électrostatique.

Les 4 quadrupôles QFA-QFD interviennent à la fois dans le réglage de la dispersion ( $D_x$  et  $D'_x$  nulles en aval de DIP) et dans le réglage des fonctions  $\beta_{x,z}$ ,  $\alpha_{x,z}$ , pour lequel on dispose en outre des 3 quadrupôles QF1-QF3; il y a donc 7 variables pour 5 contraintes, on utilise l'excédent pour contraindre (minimiser) le maximum d'amplitude  $\beta_z$  au droit de QFC.

Les Figs. 7, 8 donnent les fonctions optiques et enveloppes pour les réglages extrêmes en extrémité aval (sortie de QF4), soit  $\beta_x = 20$  m/ $\beta_z = 0.64$  m et  $\beta_x = 125$  m/ $\beta_z = 4$  m, réglages qui assurent des faisceaux ronds de diamètres respectifs environ 4 mm et 10 mm en QF4. Le "passage véhicules" de longueur 3.8 m se trouve entre les quadrupôles QFB et QFC. Le beam-stop pourrait être placé dans la région QFC-QF1, voir section 8 pour les détails.

Le Tableau 2 donne les caractéristiques des quadrupôles le long de la ligne dans la gamme de réglage  $\phi 4 \rightarrow \phi 10$  mm. La force des quadrupôles est toujours inférieure à  $3 \text{ m}^{-2}$ ,  $\forall \phi : 4 \rightarrow 10$  mm, et le gradient est donc inférieur à 20 T/m pour la rigidité  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$  atteinte à haute énergie. Les maxima d'enveloppes s'entendent en rayon, hors-tout, et sont calculés pour  $\epsilon_x/\pi = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\delta p/p = 1.1 \cdot 10^{-3}$ , pour l'étendue de la gamme de diamètres à la cible  $\phi : 4 \rightarrow 10$  mm. La Fig. 9 donne l'évolution des forces des quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre en extrémité de ligne variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm, la Fig. 10 donne l'évolution des dimensions d'enveloppes à l'intérieur des dipôles et quadrupôles. Les fonctions optiques correspondantes sont données en Annexe B.1.

Le fichier optique utilisé pour ces calculs est donné en Annexe A.2 page 36.



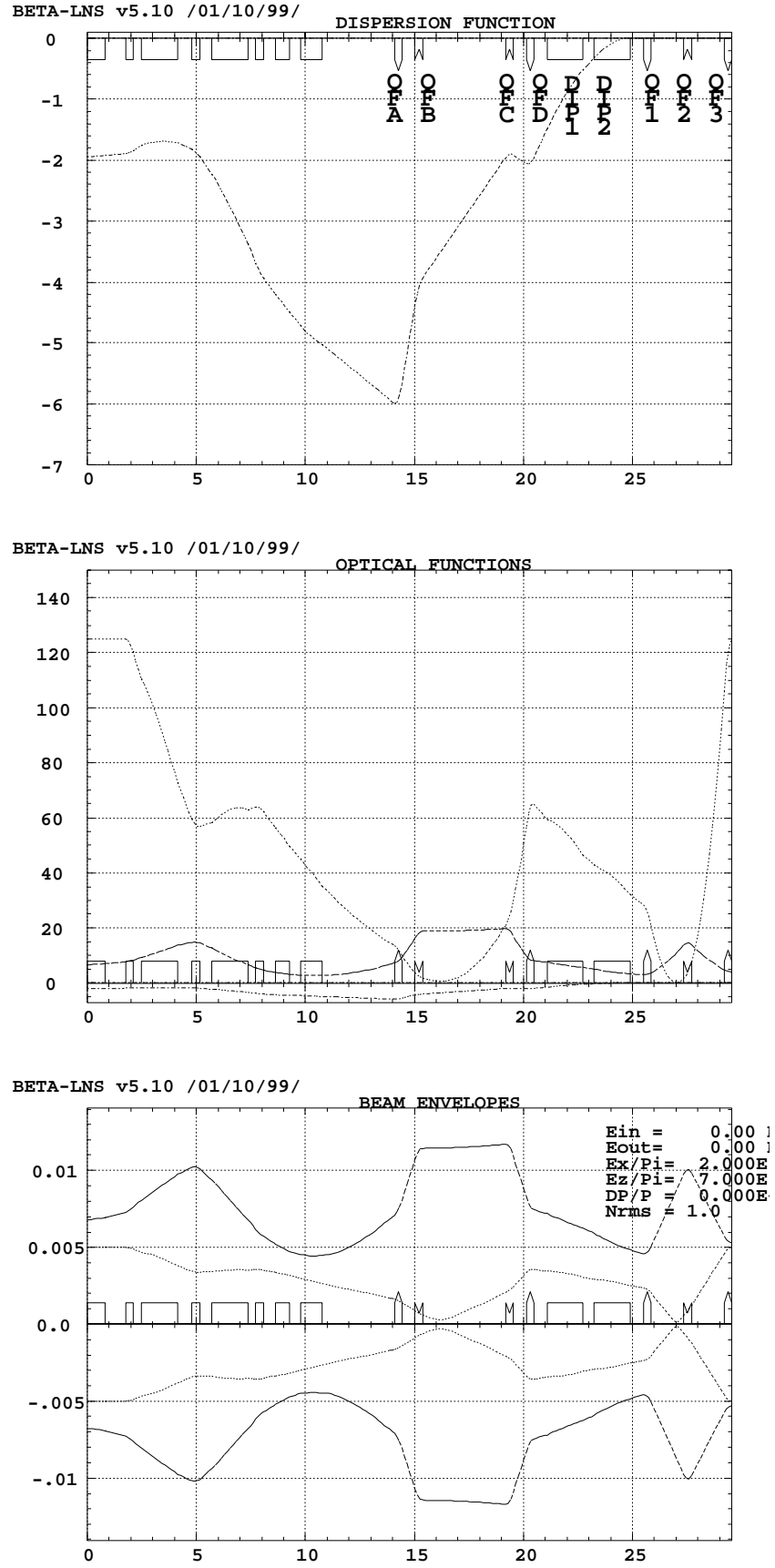


FIG. 8 – Version B - 45 degrés. Fonction de dispersion (en haut), ainsi que fonctions optiques (milieu) et enveloppes (en bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 125$  m- $\beta_z = 4$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 10 mm au droit du dernier quadrupôle.

TAB. 2 – Ligne d'extraction, version B - 45 degrés. Caractéristiques des éléments optiques pour la gamme de diamètres images (en fin de ligne)  $\phi : 4 \rightarrow 10$  mm ; L=longueur,  $\hat{X}$ ,  $\hat{Z}$  = maximum d'enveloppe,  $B_{p\hat{o}le}$  correspond à  $B\rho = 6.35$  T.m et dans les quadrupôles est donné pour un rayon au pôle de 40 mm.

	L	Force crête	$\hat{X}$	$\hat{Z}$	$\hat{B}_{p\hat{o}le}$
	m	$m^{-2}, m^{-1}$	$10^{-3}m$	$10^{-3}m$	T
QFA	0.35	1.051	8.28	8.20	0.27
QFB	0.35	-0.860	6.03	11.6	0.22
QFC	0.35	-1.2673	4.52	15.0	0.32
QFD	0.35	1.481	5.81	10.8	0.38
DIP1	1.661 (arc)	0.236423	5.08	9.66	1.5
DIP2	1.661 (arc)	0.236423	3.30	8.09	1.5
QF1	0.35	1.910	2.55	5.68	0.49
QF2	0.35	-1.903	1.23	10.2	0.49
QF3	0.35	1.713	5.00	5.81	0.43

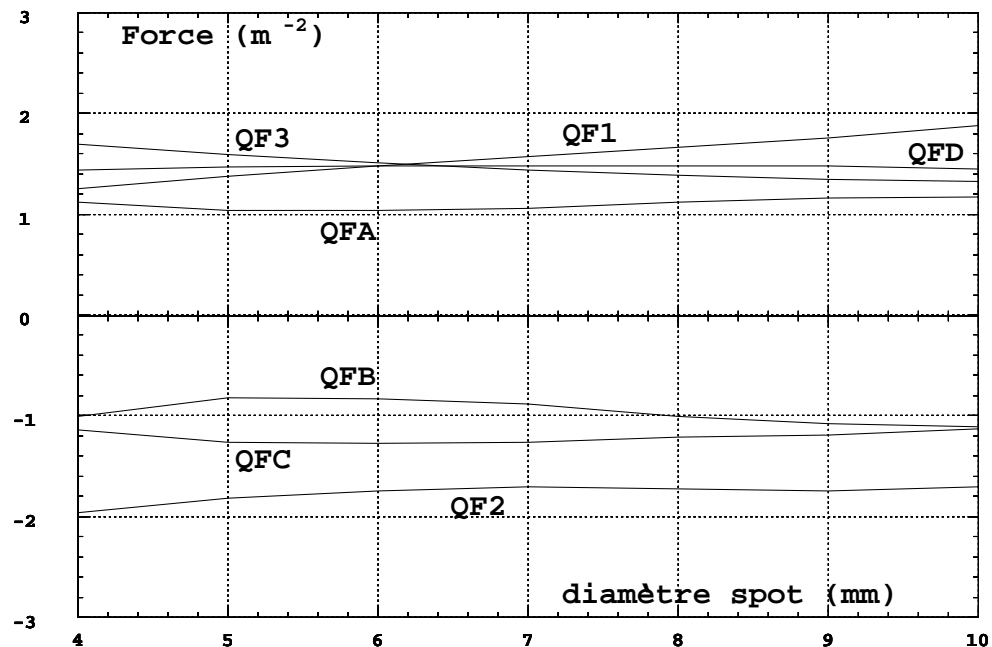


FIG. 9 – Version B - 45 degrés. Evolution des forces des quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre en extrémité de ligne variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm.

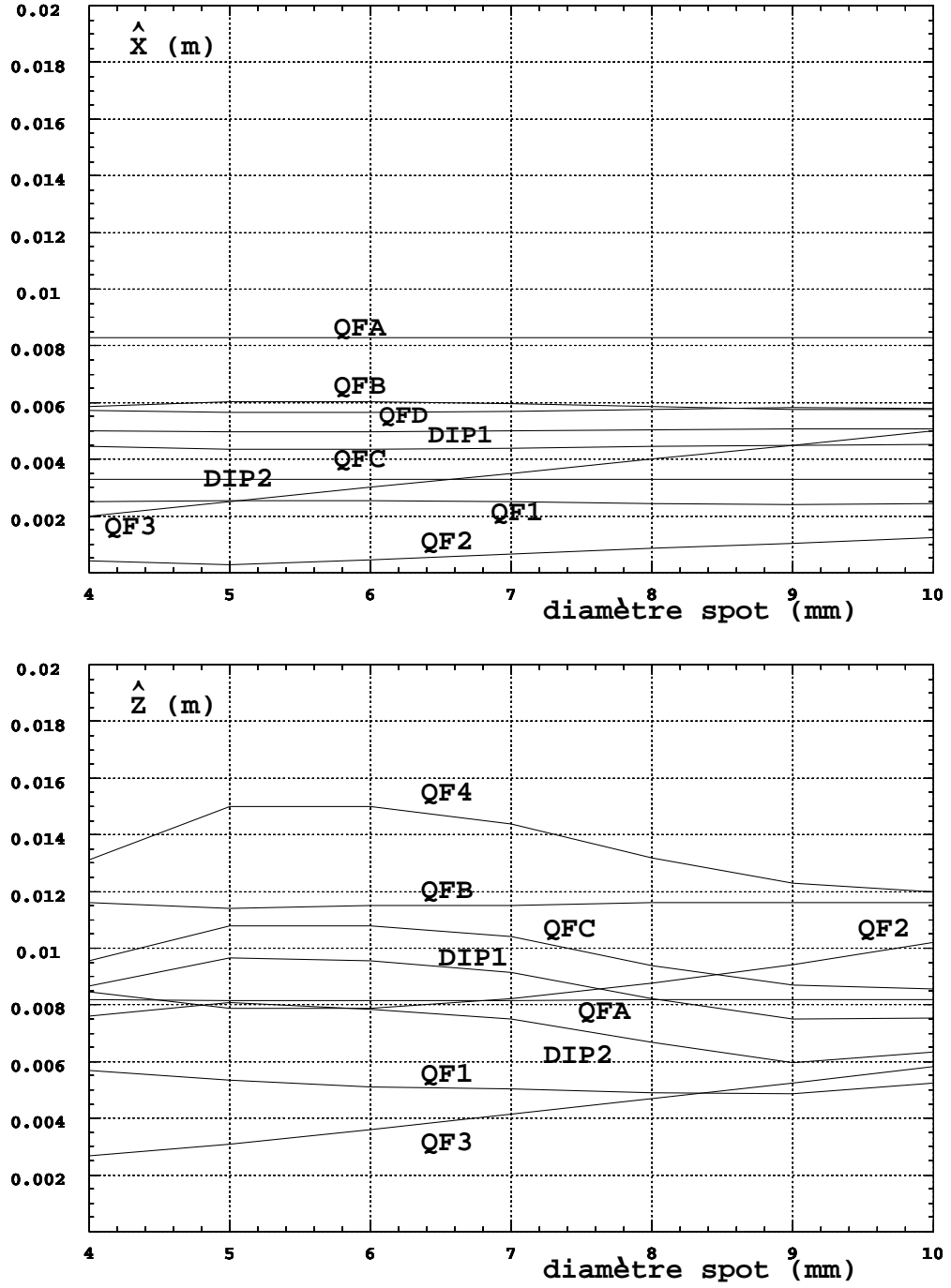


FIG. 10 – Version B - 45 degrés. Evolution des dimensions maximales d'enveloppes horizontales (en haut) et verticales (en bas) à l'intérieur des dipôles et quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm.

### 3 Module de déviation 90 degrés

Ce module assure la déviation vers les chambres d'irradiation, il est aussi utilisé à l'extrémité de la ligne d'irradiation verticale. Le synoptique en est donné en Fig. 11.

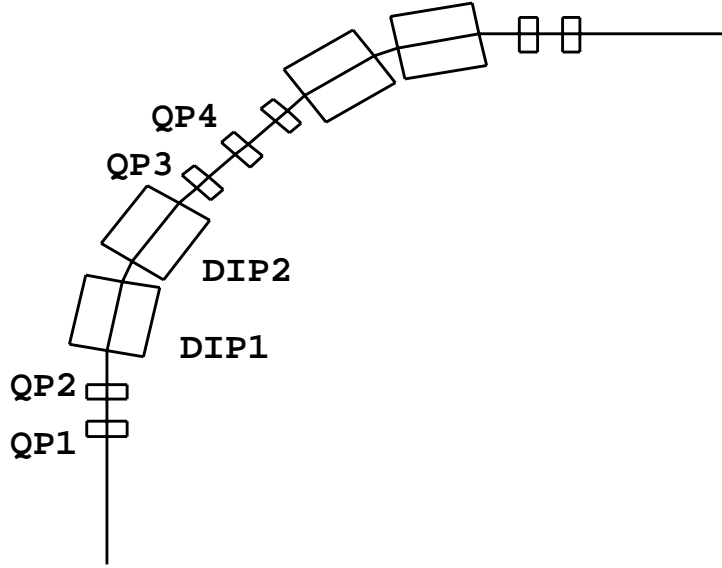


FIG. 11 – Module de déviation 90 degrés. Longueur 21.193 m.

Le module est géométriquement symétrique, la symétrie optique est ainsi assurée en couplant par paire les quadrupôles homologues. Les 4 quadrupôles d'extrémités interviennent dans le seul réglage des fonctions  $\beta_{x,z}, \alpha_{x,z}$  selon la contrainte "valeurs en sortie = valeurs en entrée" ; le système est achromatique, ceci est assuré au moyen d'un triplet central qui intervient donc à la fois dans le réglage de la dispersion et dans le réglage des fonctions  $\beta_{x,z}, \alpha_{x,z}$ .

#### 3.1 Utilisation en déviation horizontale

Il s'agit de la déviation vers les chambres d'irradiation.

Les Figs. 12, 13 donnent les fonctions optiques et enveloppes pour les réglages extrêmes  $\beta_x = 20 \text{ m}/\beta_z = 0.64 \text{ m}$  et  $\beta_x = 125 \text{ m}/\beta_z = 4 \text{ m}$  correspondant à des faisceaux ronds de diamètres respectifs environ 4 mm et 10 mm aux extrémités.

Le Tableau 3 donne les caractéristiques des quadrupôles dans la gamme de réglage  $\phi 4 \rightarrow \phi 10 \text{ mm}$ . La force des quadrupôles est toujours inférieure à  $3 \text{ m}^{-2}$ ,  $\forall \phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$ , et le gradient est donc inférieur à  $20 \text{ T/m}$  pour la rigidité  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$  atteinte à haute énergie. Les maxima d'enveloppes s'entendent en rayon, hors-tout, et sont calculés pour  $\epsilon_x/\pi = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\delta p/p = 1.1 \cdot 10^{-3}$ , pour l'étendue de la gamme de diamètres à la cible  $\phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$ . La Fig. 14 donne l'évolution des forces des quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités de ligne variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm, la Fig. 15 donne l'évolution des dimensions d'enveloppes à l'intérieur des dipôles et quadrupôles. Les fonctions optiques correspondantes sont données en Annexe B.2.

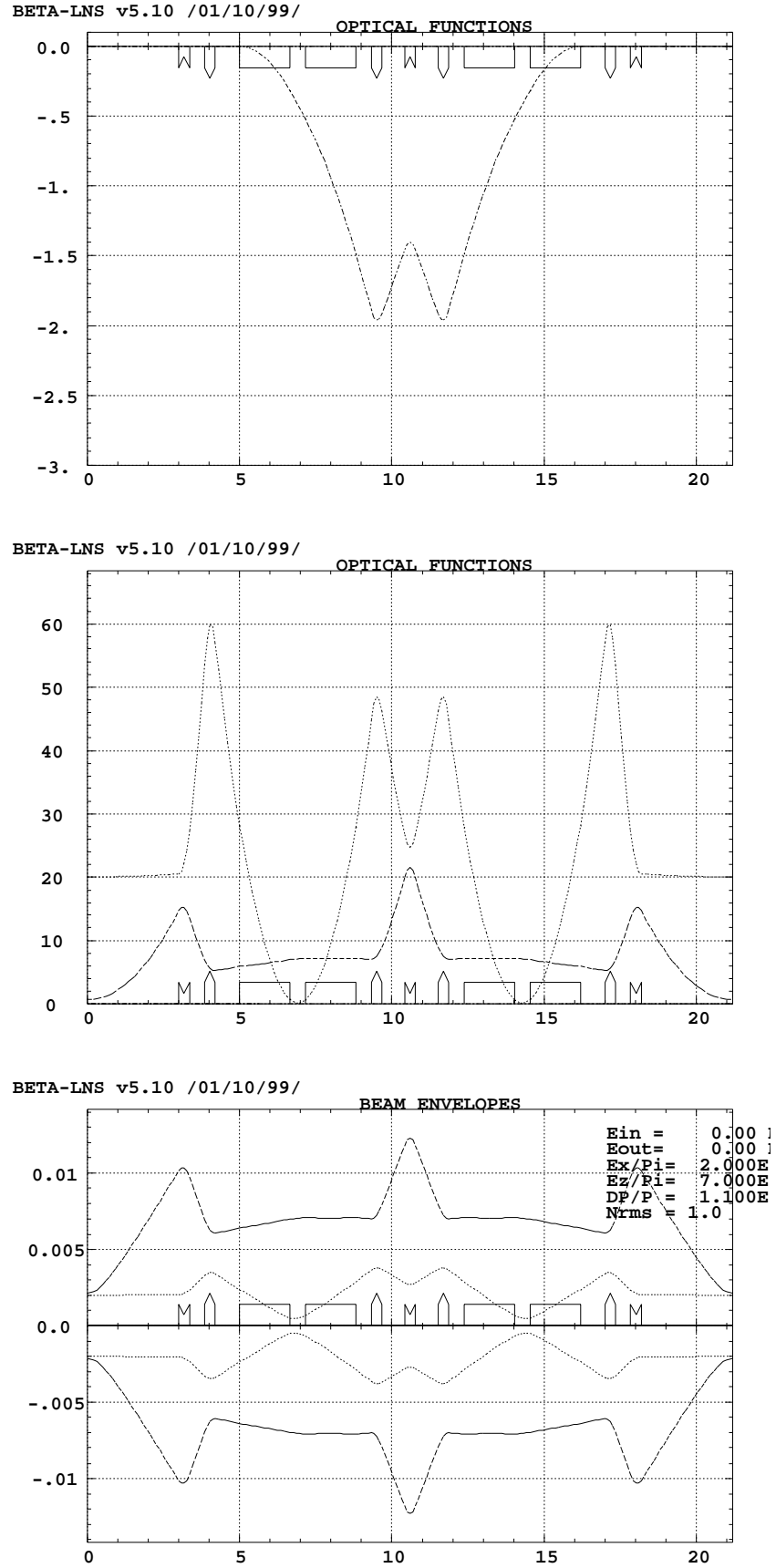


FIG. 12 – Module de déviation 90 degrés, horizontal. Fonction de dispersion (en haut), ainsi que fonctions optiques (milieu) et enveloppes (en bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 20$  m –  $\beta_z = 0.64$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 4 mm aux extrémités du module.



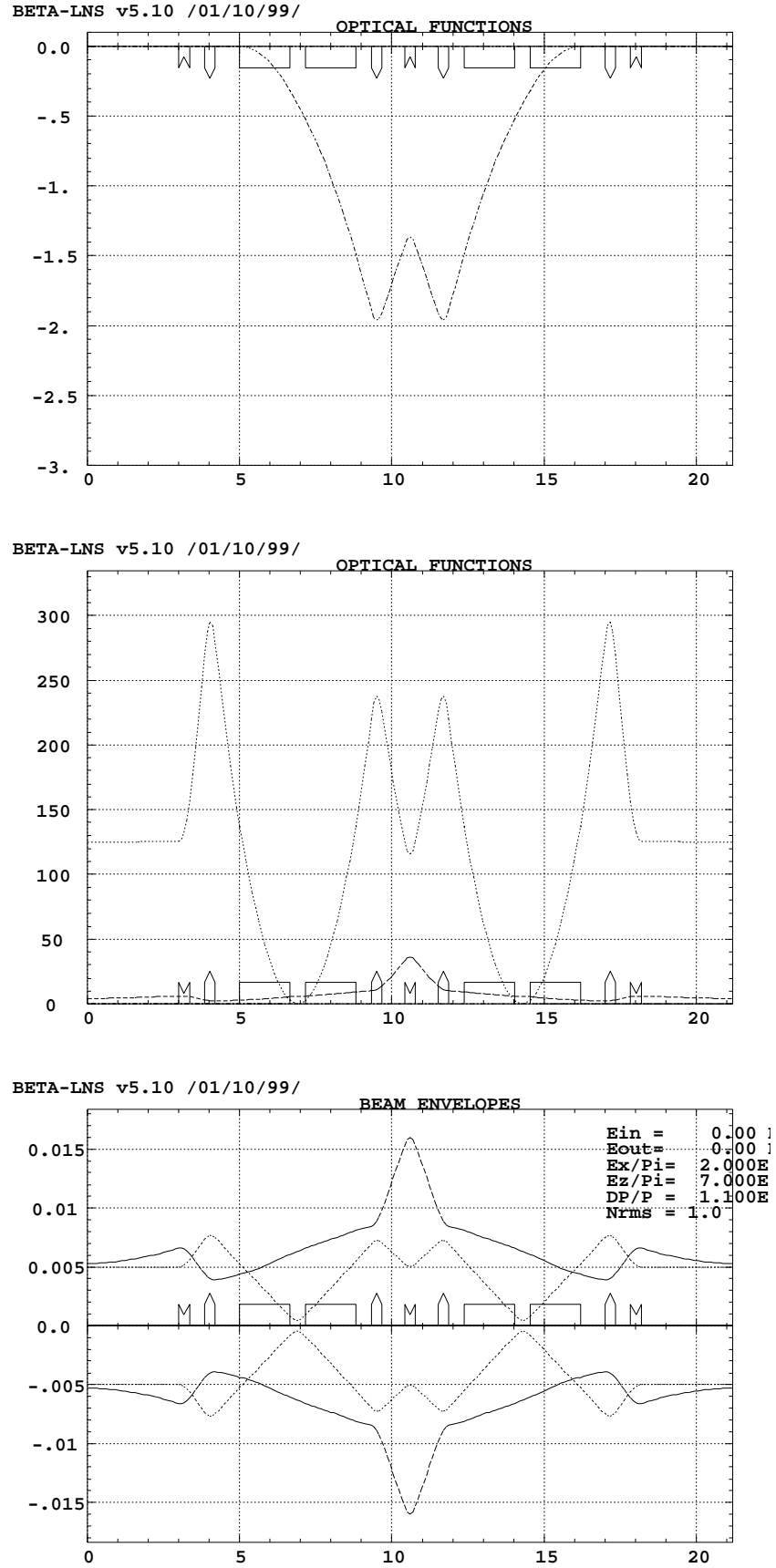


FIG. 13 – Module de déviation 90 degrés, horizontal. Fonction de dispersion (en haut), ainsi que fonctions optiques (milieu) et enveloppes (en bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 125$  m– $\beta_z = 4$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 10 mm aux extrémités du module.

TAB. 3 – Module de déviation 90 degrés, horizontal. Caractéristiques des éléments optiques pour la gamme de diamètres aux extrémités  $\phi : 4 \rightarrow 10$  mm ; L=longueur,  $\hat{X}$ ,  $\hat{Z}$  = maximum d'enveloppe,  $\hat{B}_{p\acute{o}le}$  correspond à  $B\rho = 6.35$  T.m et dans les quadrupôles est donnée pour un rayon au pôle de 40 mm.

	L	Force crête	$\hat{X}$	$\hat{Z}$	$\hat{B}_{p\acute{o}le}$
	m	$m^{-2}, m^{-1}$	$10^{-3}m$	$10^{-3}m$	T
QP1	0.35	-2.468	5.60	10.4	0.63
QP2	0.35	2.609	7.67	7.05	0.66
DIP1	1.661 (arc)	0.236423	5.22	7.2	1.5
DIP2	1.661 (arc)	0.236423	6.85	8.71	1.5
QP3	0.35	2.125	9.04	10.4	0.54
QP4	0.35	-2.665	6.57	16.8	0.68

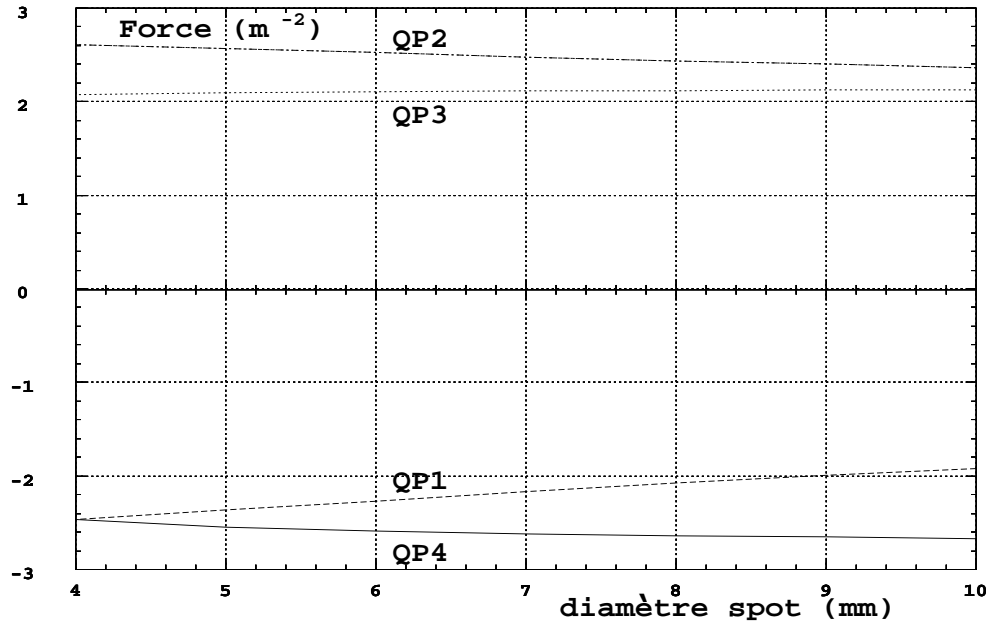


FIG. 14 – Module de déviation 90 degrés. Evolution des forces des quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm.

On peut s'interroger sur la possibilité de rallonger la section droite finale d'environ 50 cm pour des raisons de traitement médical, ce qui aurait pour inconvénient de dyssymétriser le module (géométriquement). L'étude optique montre que l'on parvient cependant à préserver de façon satisfaisante les waists H et V en bout de ligne tout en conservant les quadrupôles homologues en fonctionnement couplé ; ceci tient au caractère très "plat" des fonction  $\beta_{x,z}$  en extrémité de structure.

Le fichier optique utilisé pour ces calculs est donné en Annexe A.3 page 38.

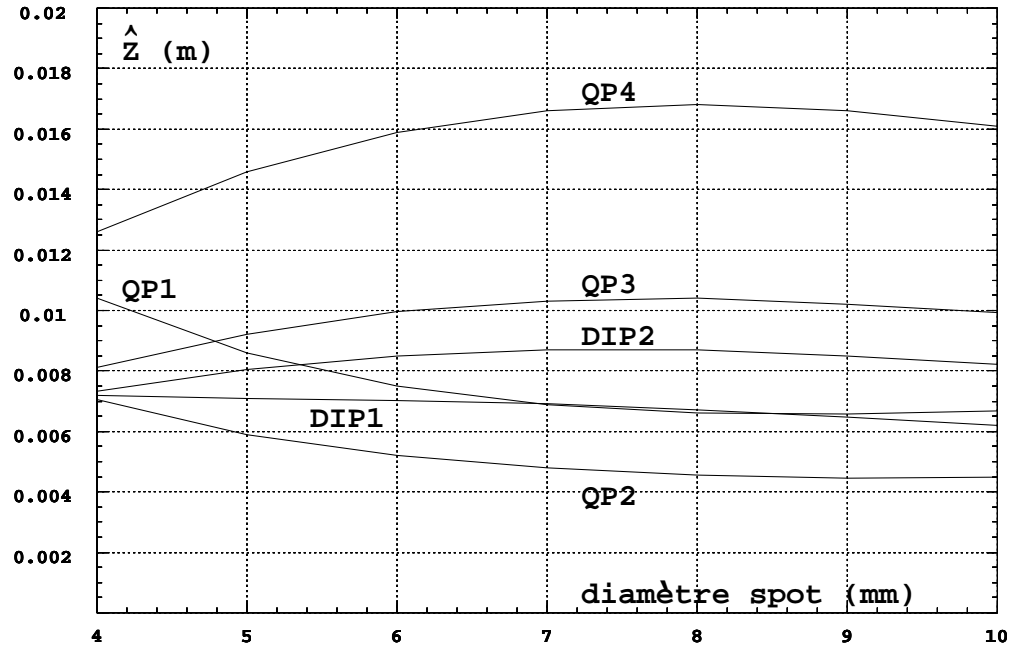
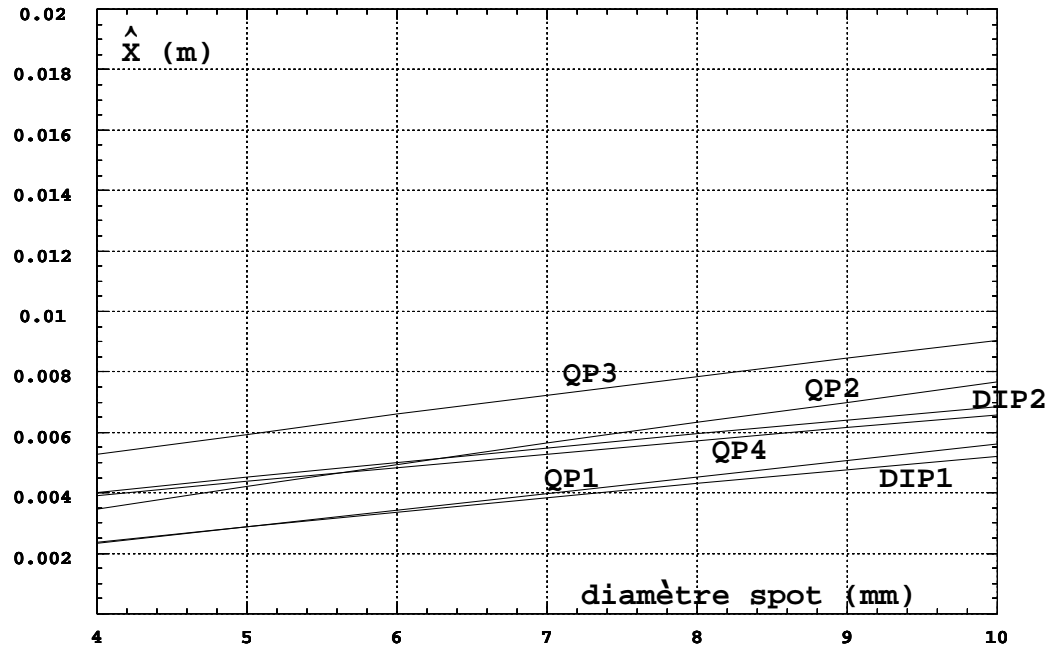


FIG. 15 – Module de déviation 90 degrés. Evolution des dimensions maximales d'enveloppes horizontales (en haut) et verticales (en bas) à l'intérieur des dipôles et quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm.

### 3.2 Utilisation en déviation verticale

Il s'agit de la déviation située à l'extrémité aval de la ligne d'irradiation verticale (cf. Section 5), sa géométrie est la même que précédemment (Fig. 11), le réglage optique est changé (les fonctions  $\beta$  sont permutées) car  $\epsilon_x \neq \epsilon_z$ .

Les Figs. 16, 17 donnent les fonctions optiques et enveloppes pour les réglages extrêmes  $\beta_x = 20 \text{ m}/\beta_z = 0.64 \text{ m}$  et  $\beta_x = 125 \text{ m}/\beta_z = 4 \text{ m}$  correspondant à des faisceaux ronds de diamètres respectifs environ 4 mm et 10 mm aux extrémités.

Le Tableau 4 donne les caractéristiques des quadrupôles dans la gamme de réglage  $\phi 4 \rightarrow \phi 10 \text{ mm}$ . La force du quadrupôle central évolue de 3 à  $4.2 \text{ m}^{-2}$  dans l'intervalle  $\phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$  ce qui donne un gradient max de 20 T/m pour  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$ ; la force des autres quadrupôles est toujours inférieure à  $3 \text{ m}^{-2}$ ,  $\forall \phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$  et leur gradient est donc inférieur à 20 T/m pour la rigidité  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$  atteinte à haute énergie. Les maxima d'enveloppes s'entendent en rayon, hors-tout, et sont calculés pour  $\epsilon_x/\pi = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\delta p/p = 1.1 \cdot 10^{-3}$ , pour l'étendue de la gamme de diamètres à la cible  $\phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$ , selon<sup>2</sup> (avec Y = X ou Z) :

$$\hat{Y} = \sqrt{\beta_y \epsilon_y / \pi + |D_y \delta p / p|} \quad (1)$$

TAB. 4 – Module de déviation 90 degrés, vertical. Caractéristiques des éléments optiques pour la gamme de diamètres aux extrémités  $\phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$ ; L=longueur,  $\hat{X}$ ,  $\hat{Z}$  = maximum d'enveloppe,  $\hat{B}_{p\hat{o}le}$  correspond à  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$  et dans les quadrupôles est donnée pour un rayon au pôle de 40 mm.

Note : X, Z s'entendent dans le référentiel du labo, par conséquent l'entrefer des dipôles est ici dans la direction X.

	L m	Force crête $\text{m}^{-2}, \text{m}^{-1}$	$\hat{X}$ $10^{-3} \text{ m}$	$\hat{Z}$ $10^{-3} \text{ m}$	$\hat{B}_{p\hat{o}le}$ T
QP1	0.35	1.7630	5.00	12.6	0.45
QP2	0.35	-2.633	3.20	18.7	0.6
DIP1	1.661 (arc)	0.236423	2.44	12.8	1.5
DIP2	1.661 (arc)	0.236423	1.50	14.4	1.5
QP3	0.35	-2.452	1.07	19.0	0.62
QP4	0.35	4.162	1.84	13.5	1.06

La Fig. 18 donne l'évolution des forces des quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités de ligne variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm, la Fig. 19 donne l'évolution des dimensions d'enveloppes à l'intérieur des dipôles et quadrupôles.

---

<sup>2</sup>L'addition en valeur absolue donne une marge supérieure par rapport à la moyenne quadratique.

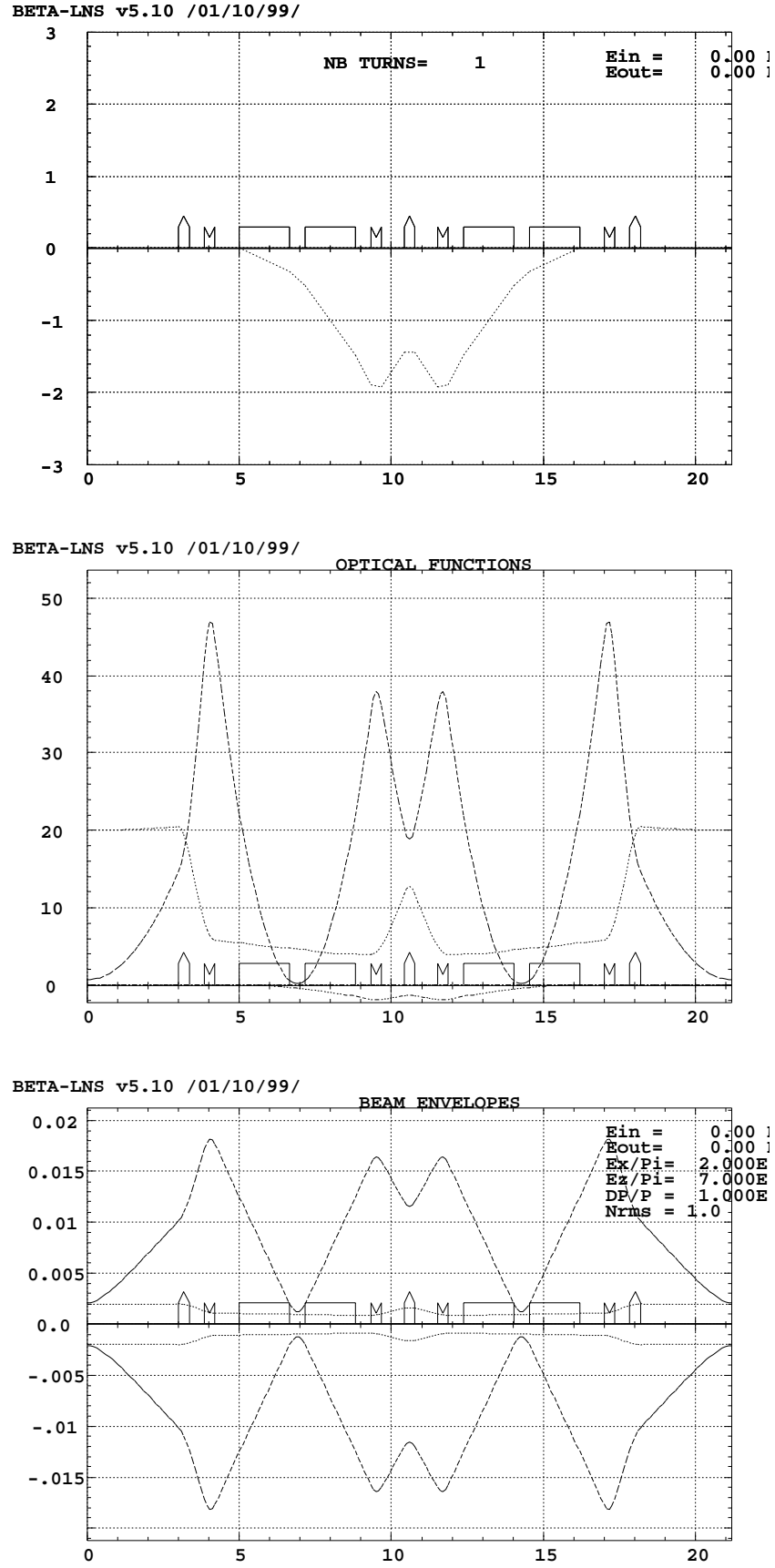


FIG. 16 – Module de déviation 90 degrés, vertical. Fonction de dispersion (en haut), ainsi que fonctions optiques (milieu) et enveloppes (en bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 20$  m –  $\beta_z = 0.64$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 4 mm aux extrémités du module.

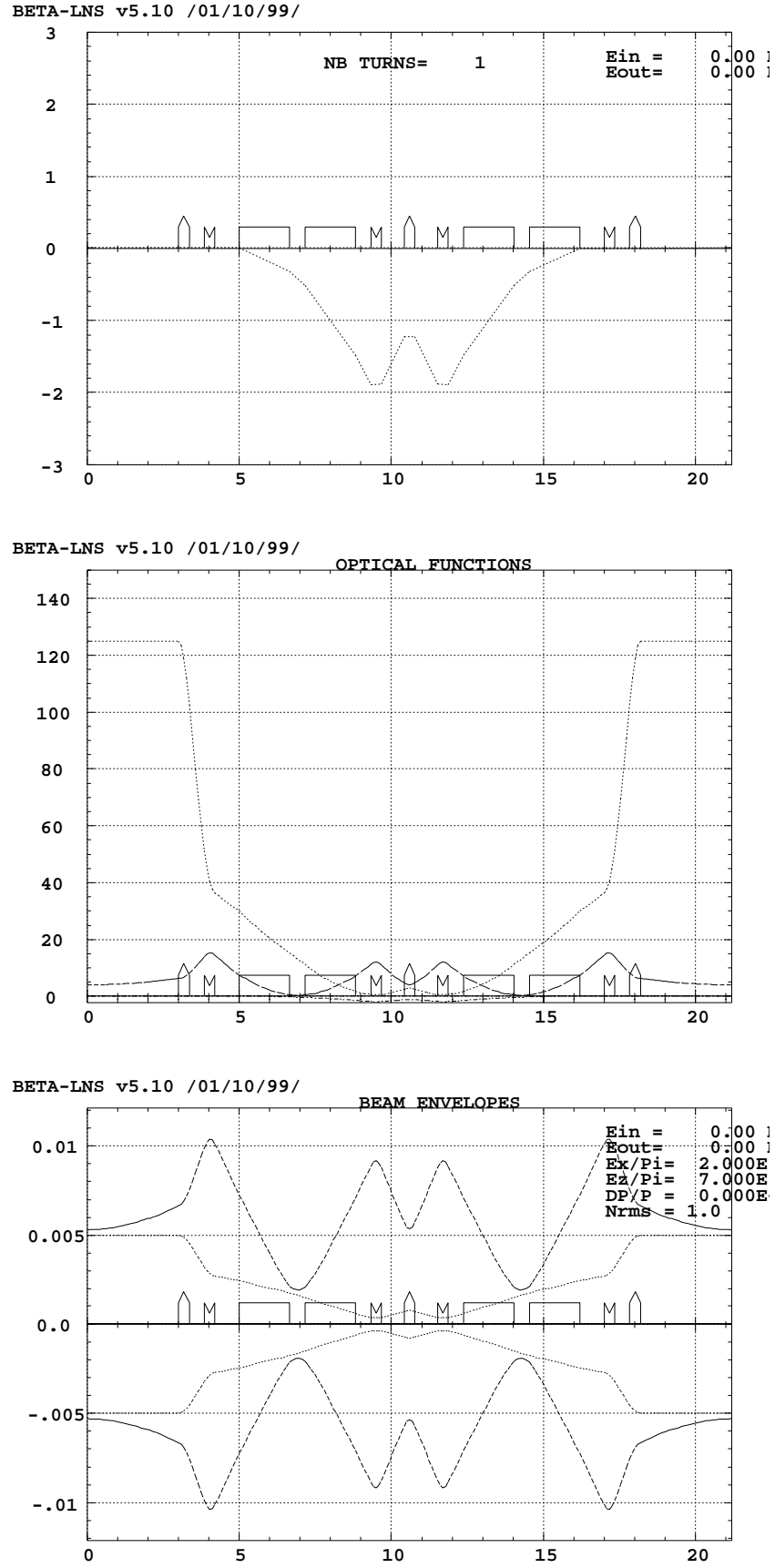


FIG. 17 – Module de déviation 90 degrés. Fonction de dispersion (en haut), ainsi que fonctions optiques (milieu) et enveloppes (en bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 125$  m- $\beta_z = 4$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 10 mm aux extrémités du module.

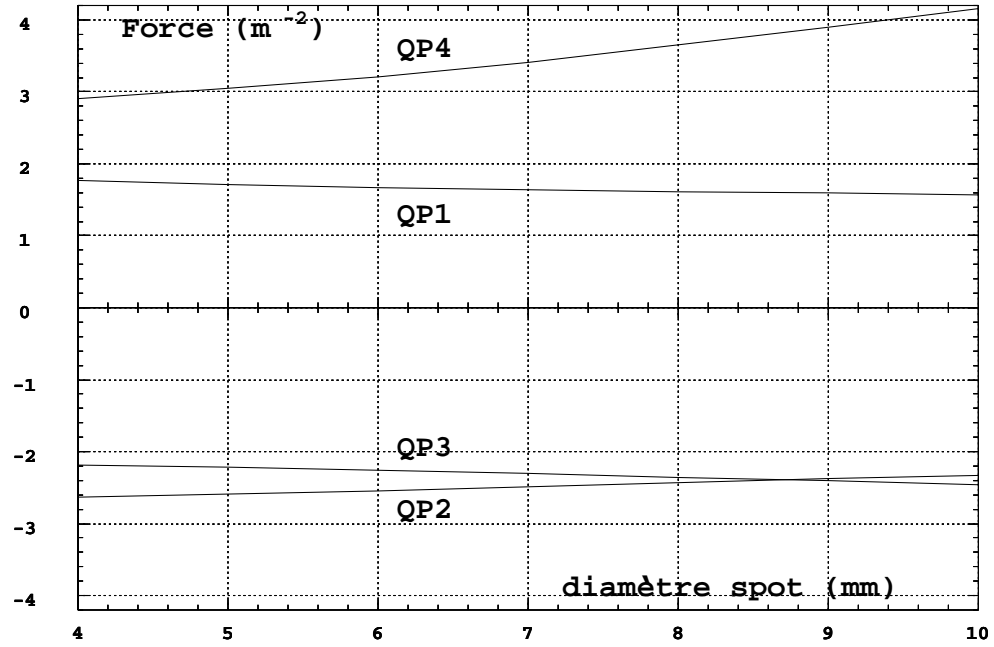


FIG. 18 – Module de déviation 90 degrés, utilisation verticale. Evolution des forces des quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm.

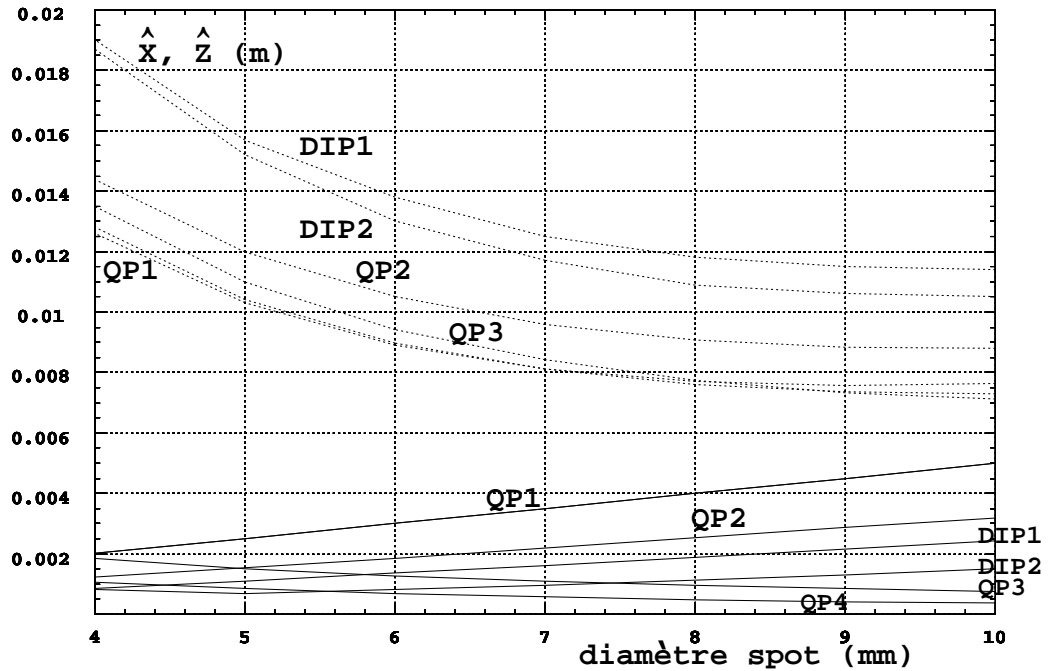


FIG. 19 – Module de déviation 90 degrés, utilisation verticale. Evolution des dimensions maximales d'enveloppes horizontales (traits pleins) et verticales (pointillés) à l'intérieur des dipôles et quadrupôles lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm.

## 4 Module FODO

Le module FODO est utilisé entre les modules de déviation horizontaux à 90 degrés. Il assure le transfert des fonctions bêta tron selon une transformation  $-I$  obtenue avec une force de  $\pm 2.356 \text{ m}^{-2}$  dans les 4 quadrupôles, indépendamment des fonctions bêta tron recherchées. Ces 4 quadrupôles sont connectés en deux paires (QDA,QDB), (QFB,QFD). Le Tableau 5 en regroupe les caractéristiques générales.

TAB. 5 – Module FODO. Caractéristiques des quadrupôles valables pour la gamme de diamètres images  $\phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$ ; L=longueur,  $\hat{X}, \hat{Z}$  = maximum d'enveloppe,  $B_{pôle}$  correspond à  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$  et est donné pour un rayon au pôle de 40 mm.

	L	Force ( $\forall \phi$ )	$\hat{X}-\hat{Z}$	max $B_{pôle}$
	m	$\text{m}^{-2}$	m	T
QDA	0.35	-2.356	10.5	0.6
QFB	0.35	2.356	8.37	0.6
QDC	0.35	-2.356	9.53	0.6
QFD	0.35	2.356	6.37	0.6

La Fig. 20 donne les fonctions beta et enveloppes correspondant aux diamètres extrêmes  $\phi 4 \text{ mm}$  et  $\phi 10 \text{ mm}$  à la cible.

Le fichier optique utilisé pour ces calculs est donné en Annexe A.4 page 38.

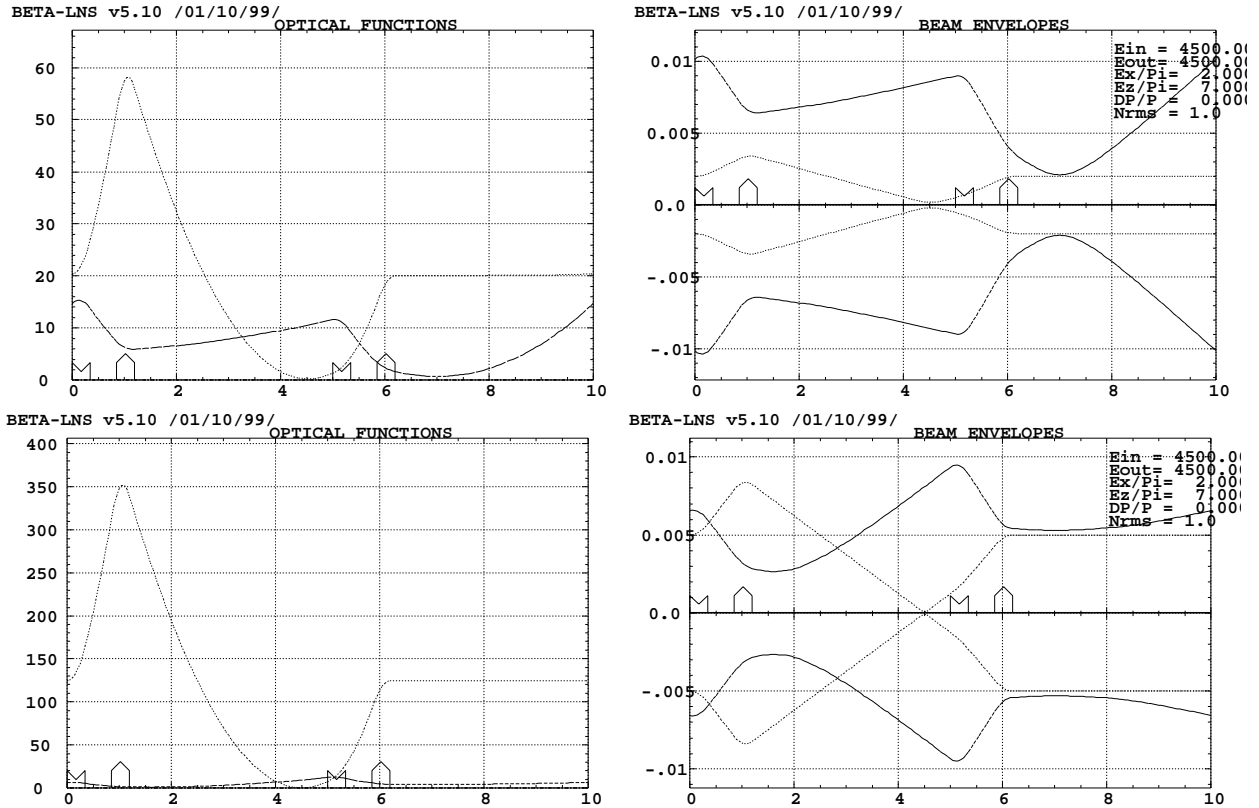


FIG. 20 – Module FODO. Fonctions optiques (colonne de gauche) dans les réglage  $\phi 4 \text{ mm}$  (en haut),  $\phi 10 \text{ mm}$  (en bas), et enveloppes correspondantes (colonne de droite) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ .



## 5 Ligne faisceau verticale

Cette ligne assure le transport du faisceau jusqu'à la chambre d'irradiation verticale. Elle débute par un "module de déviation 90 degrés" (Fig. 11) horizontal tout comme les lignes de desserte des deux chambres amont ; elle se termine par un "module de déviation 90 degrés" vertical. Entre ces deux modules on trouve une section en "S" qui permet l'élévation du faisceau depuis le niveau du sol jusqu'au point culminant, constituée d'une paire de dipôles verticaux à chaque extrémité encadrant cinq quadrupôles disposés le long d'une section droite d'environ 15,6 m.

La partie horizontale, amont, est constituée du "module de déviation 90 degrés" (avec une section droite finale raccourcie à 0.8 m au lieu de 3 m) tel que décrit en Section 3.1 et dont les caractéristiques sont données en Tableau 3 page 18. La déviation de 90 degrés finale, en aval, est elle aussi constituée du même module (avec une section droite initiale raccourcie), mais avec une optique différente imposée par la permutation des fonctions optiques horizontales et verticale, comme décrit en Section 3.2 et dans le Tableau 4 page 20.

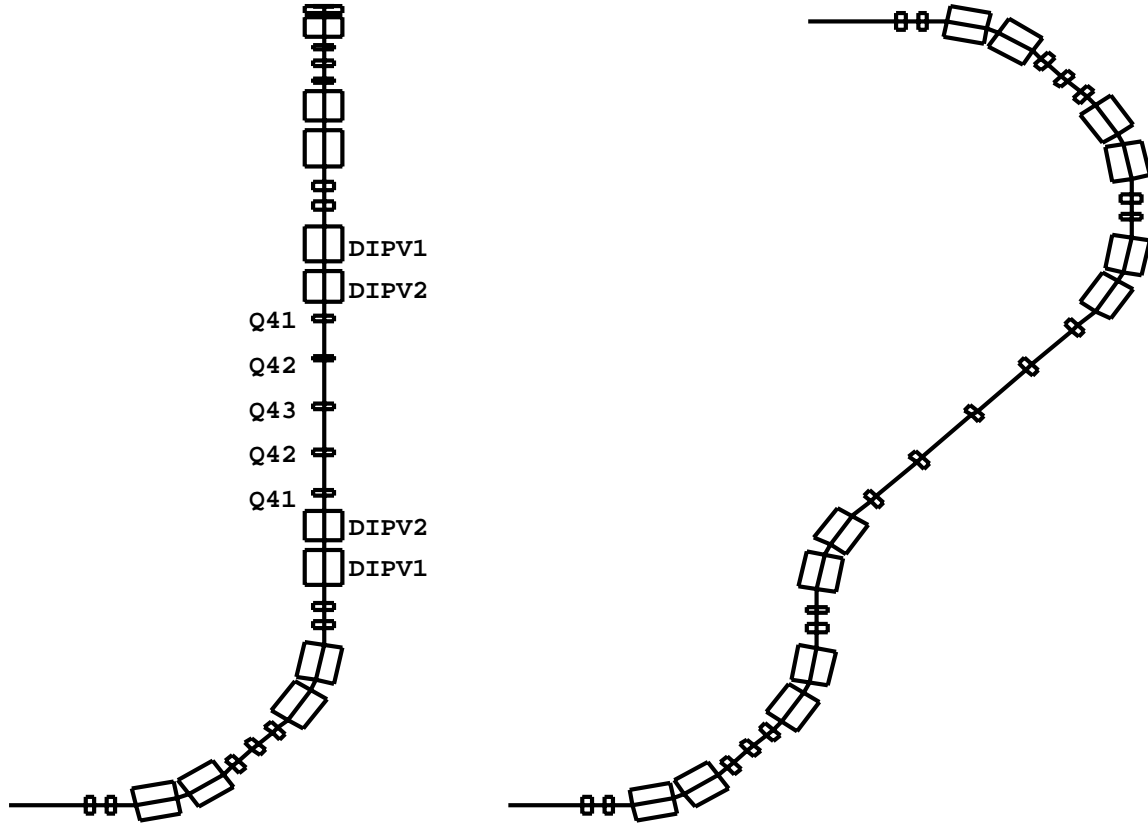


FIG. 21 – Ligne faisceau verticale. Gauche : vue de dessus. Droite : projection dans le plan horizontal. Longueur 59.113 m.

Les Figs. 22, 23 montrent les fonctions beta et enveloppes dans les réglages extrêmes correspondant aux diamètres  $\phi 4$  mm et  $\phi 10$  mm à la cible.

La seule partie de cette ligne non encore décrite est donc la section d'ascension ver-

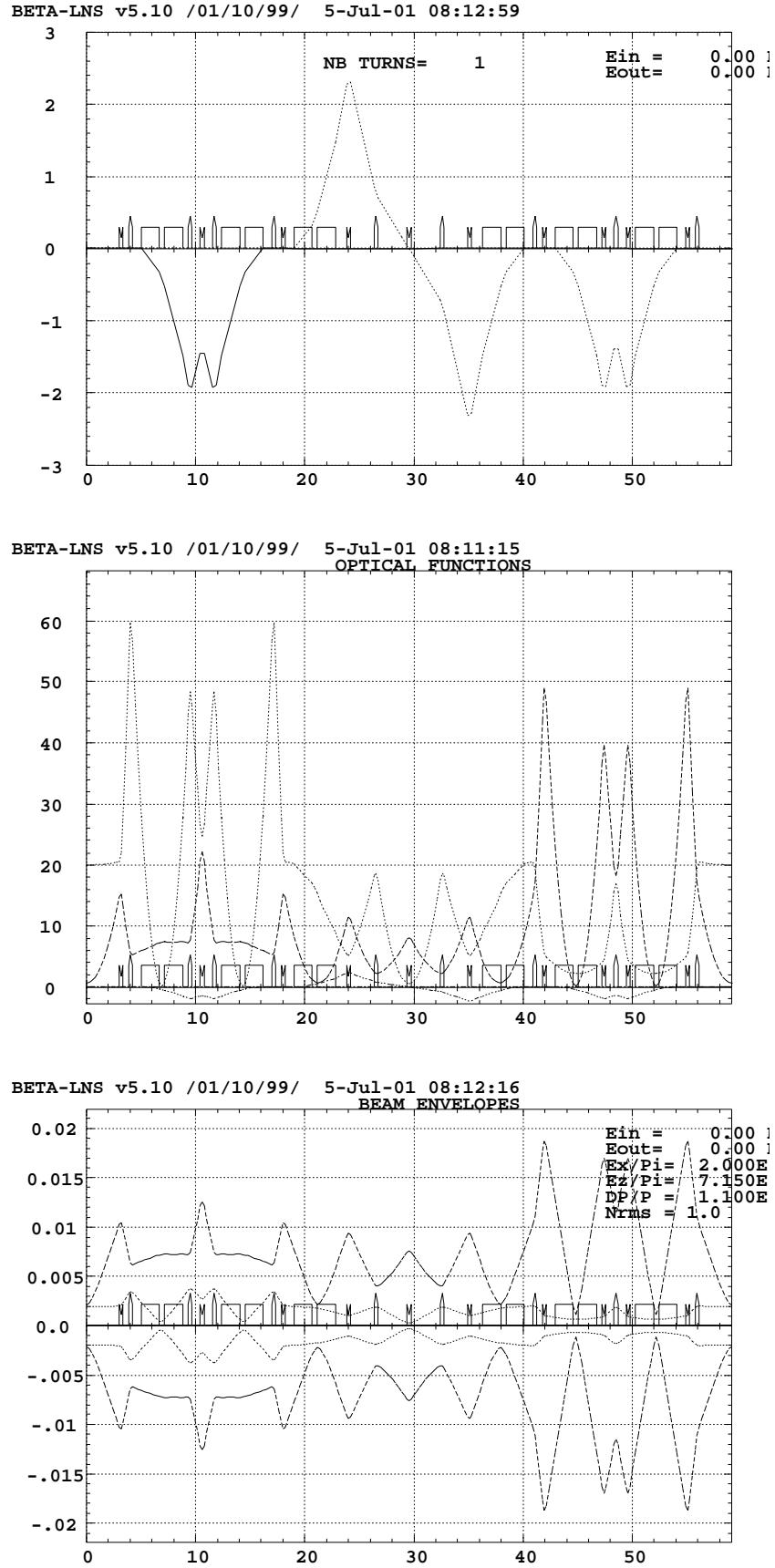


FIG. 22 – Ligne faisceau verticale. Fonctions de dispersion horizontale  $D_x(s)$  en trait plein, verticale  $D_z(s)$  en pointillés (en haut), ainsi que fonctions optiques (milieu) et enveloppes (en bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 20$  m –  $\beta_z = 0.64$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 4 mm aux extrémités du module.

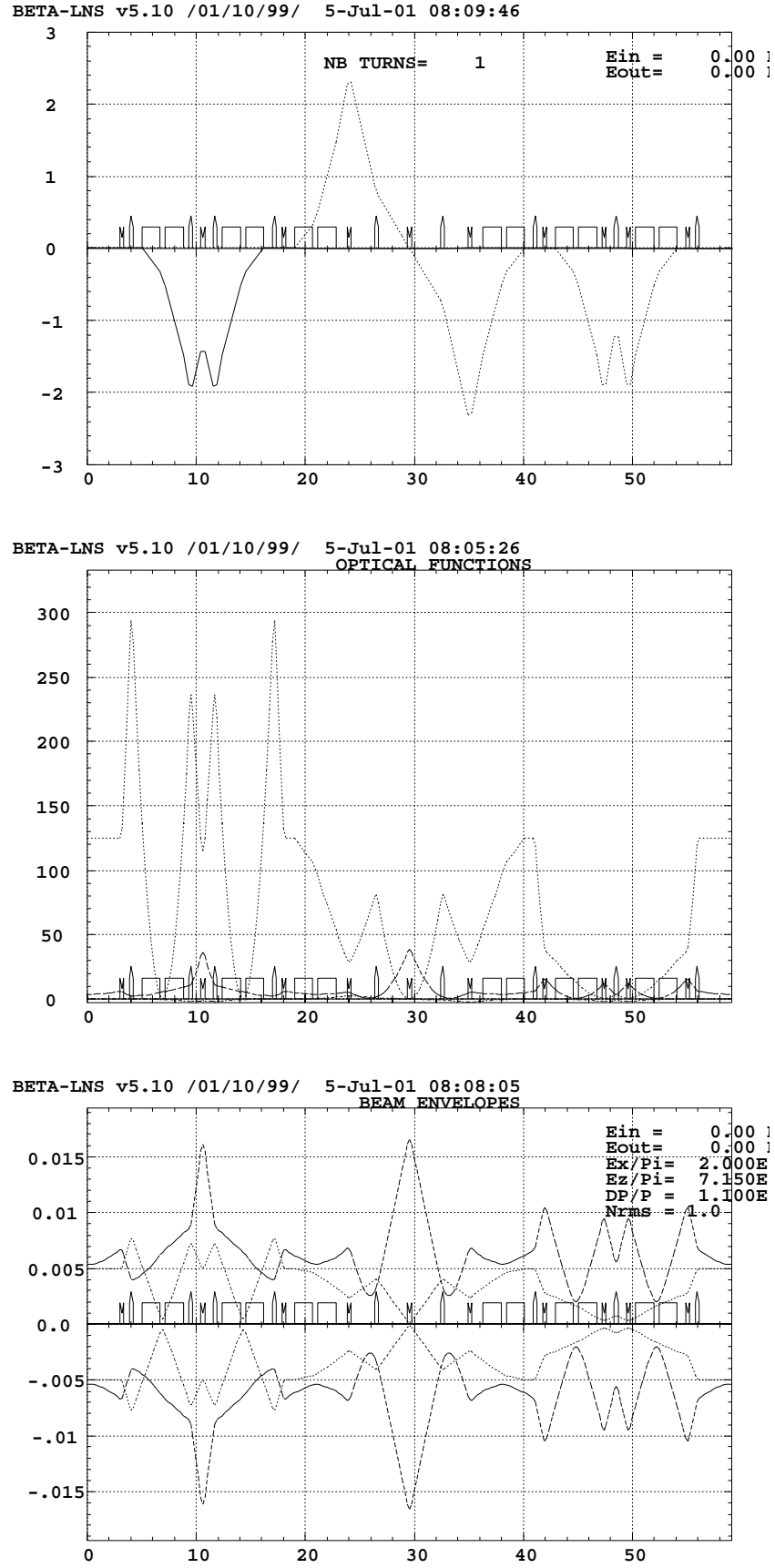


FIG. 23 – Ligne faisceau verticale. Fonctions de dispersion horizontale en trait plein, verticale en pointillé (en haut), ainsi que fonctions optiques (milieu) et enveloppes (en bas) pour  $\epsilon_x = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad, dans le réglage  $\beta_x = 125$  m– $\beta_z = 4$  m  $\rightarrow$  diamètre de faisceau d'environ 10 mm aux extrémités du module.

ticale qui suit directement la déviation horizontale 90 degrés amont ; ses caractéristiques sont données au Tableau 6. La force des cinq quadrupôles mis en jeu est toujours inférieure à  $3 \text{ m}^{-2}$ ,  $\forall \phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$ , et le gradient est donc inférieur à  $20 \text{ T/m}$  pour la rigidité  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$  atteinte à haute énergie. Les maxima d'enveloppes s'entendent en rayon, hors-tout, et sont calculés pour  $\epsilon_x/\pi = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$ ,  $\delta p/p = 1.1 \cdot 10^{-3}$ , pour l'étendue de la gamme de diamètres à la cible  $\phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$ ,

TAB. 6 – Ligne faisceau verticale. Caractéristiques des éléments optiques de la partie verticale amont, pour la gamme de diamètres images (en fin de ligne)  $\phi : 4 \rightarrow 10 \text{ mm}$  ; L=longueur,  $\hat{X}$ ,  $\hat{Z}$  = maximum d'enveloppe,  $B_{\text{pôle}}$  correspond à  $B\rho = 6.35 \text{ T.m}$  et dans les quadrupôles est donné pour un rayon au pôle de  $40 \text{ mm}$ .

Note : X, Z s'entendent dans le référentiel du labo, par conséquent l'entrefer des dipôles est ici dans la direction X.

	L m	Force crête $\text{m}^{-2}, \text{m}^{-1}$	$\hat{X}$ $10^{-3} \text{m}$	$\hat{Z}$ $10^{-3} \text{m}$	$\hat{B}_{\text{pôle}}$ T
DIPV1	1.661 (arc)	0.236423	5.00	7.66	1.5
DIPV2	1.661 (arc)	0.236423	4.38	7.37	1.5
Q41	0.35	-1.781	2.48	11.7	0.46
Q42	0.35	1.529	4.02	5.14	0.39
Q43	0.35	-1.617	0.35	16.6	0.41

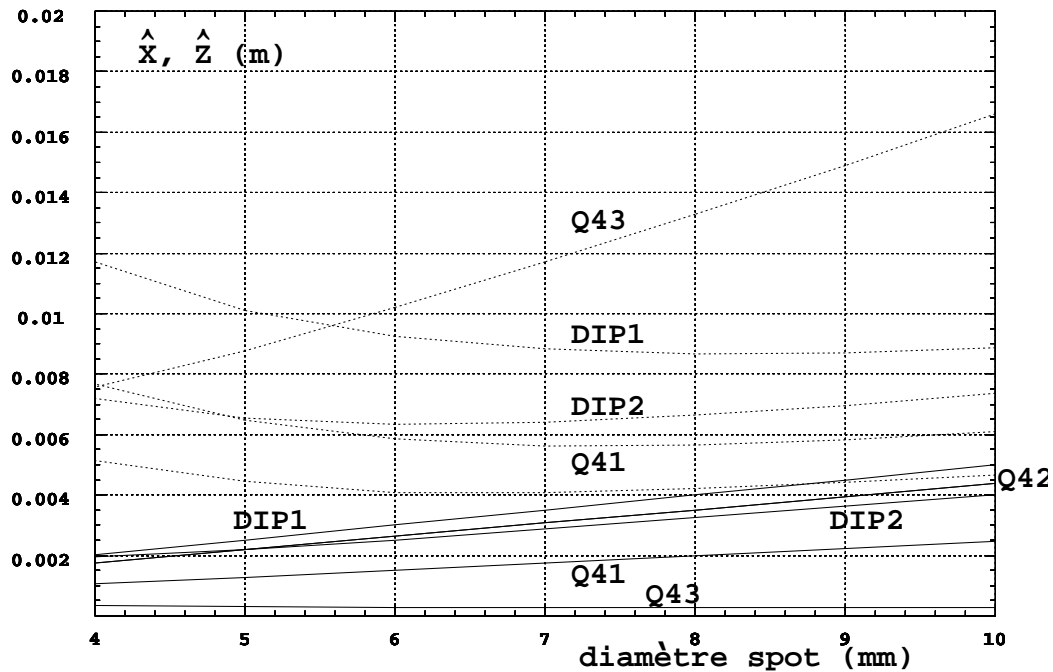


FIG. 24 – Ligne faisceau verticale, section amont. Evolution des dimensions maximales d'enveloppes horizontales (traits pleins) et verticales (pointillés) à l'intérieur des dipôles DIPV1 et DIPV2 et quadrupôles Q41, Q42, Q43 (notations de la Fig.21), lors d'un scan des fonctions optiques, le diamètre aux extrémités variant de 4 à 10 mm par pas de 1 mm.

Le fichier optique utilisé pour ces calculs est donné en Annexe A.5 page 39.

## 6 Ensemble extraction-desserte chambre 1

La ligne ici décrite regroupe la section “extraction” dans la version B (déviatoin de 45 deg., Fig. 6), suivie d’un module “déviatoin 90 degrés” (Fig. 11) assurant la desserte de la chambre 1.

La Fig. 25 donne le synoptique de l’assemblage, la Fig. 26 donne les fonctions optiques ainsi que les enveloppes faisceau dans le réglage  $\phi 10$  mm à la cible.

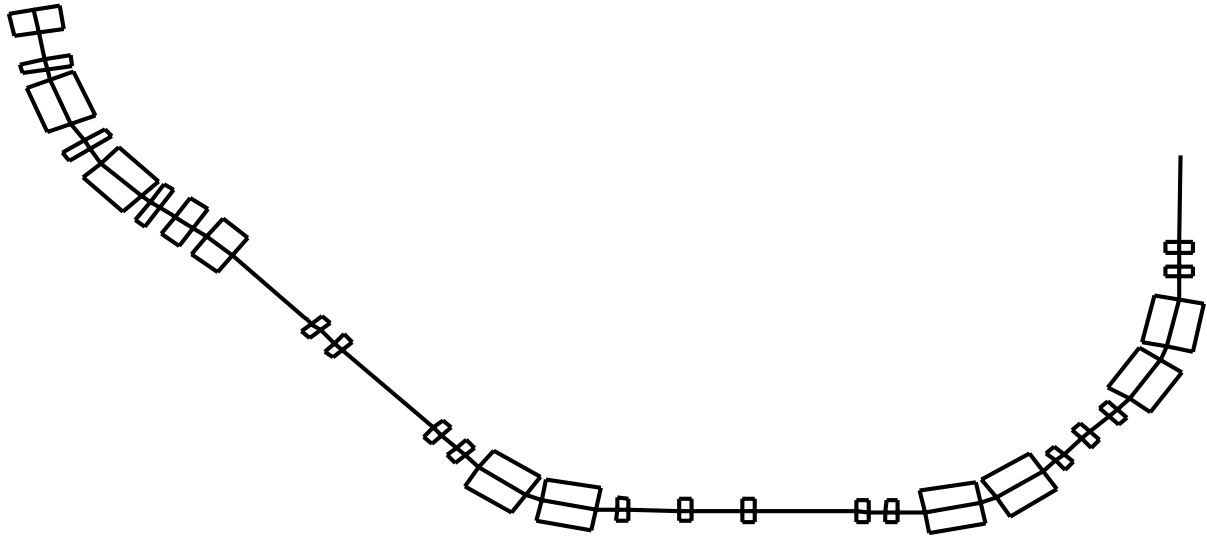


FIG. 25 – Ensemble extraction-desserte chambre 1. Longueur 50.746 m.

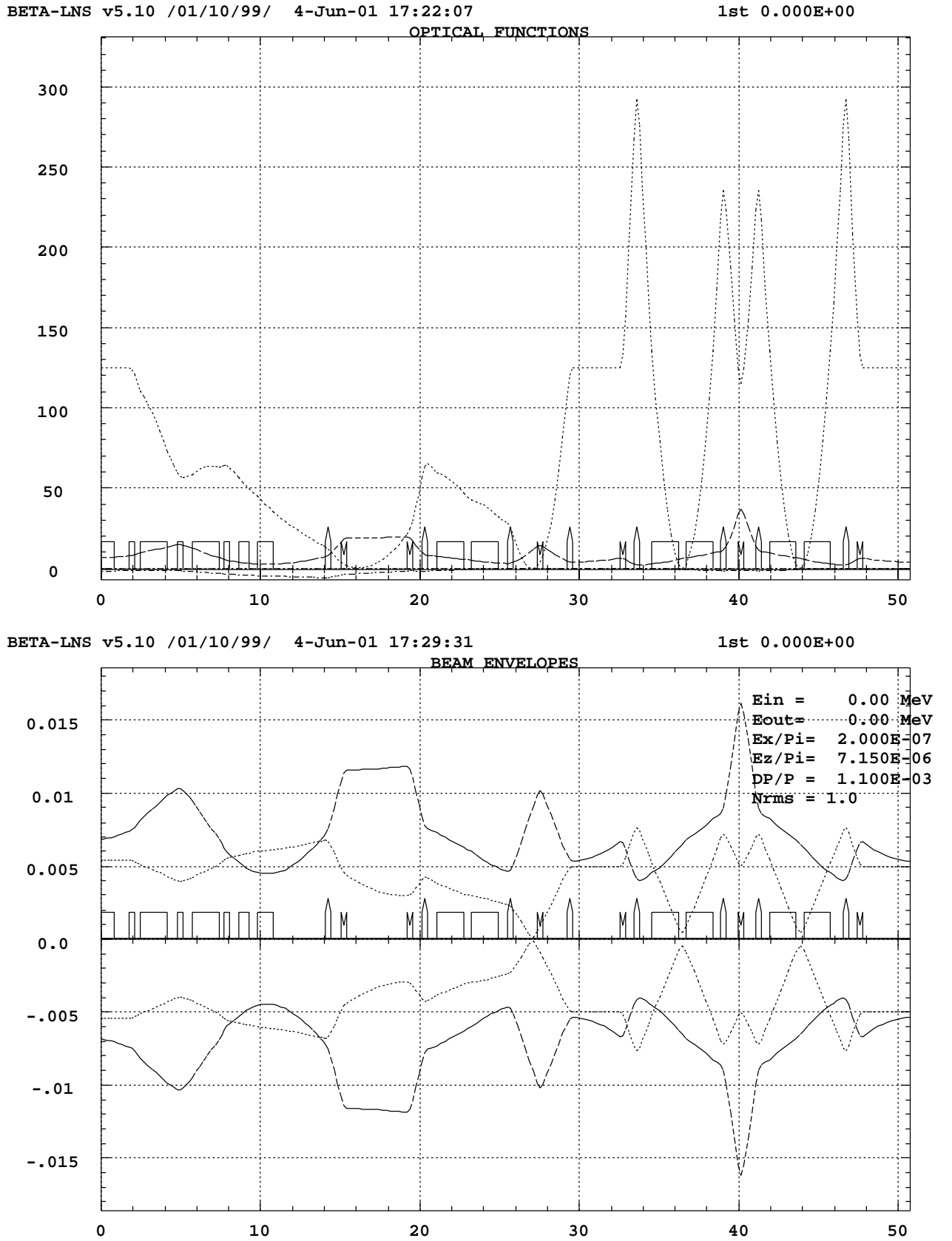


FIG. 26 – De l'extraction à la première chambre d'irradiation. Fonctions optiques, et enveloppes obtenues pour  $\epsilon_x/\pi = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\delta p/p = 1.1 \cdot 10^{-3}$ , réglage optique au diamètre 10 mm à la cible.

## 7 Ensemble extraction-ligne faisceau verticale

La ligne ici décrite regroupe la section “extraction” dans la version B (déviation de 45 deg., Fig. 6), suivie de deux modules FODO (Fig. 20) puis du module de ligne faisceau verticale (Fig. 21).

La Fig. 27 donne le synoptique de l’assemblage, et la Fig. 28 les fonctions optiques et enveloppes faisceau dans le réglage  $\phi 10$  mm à la cible.

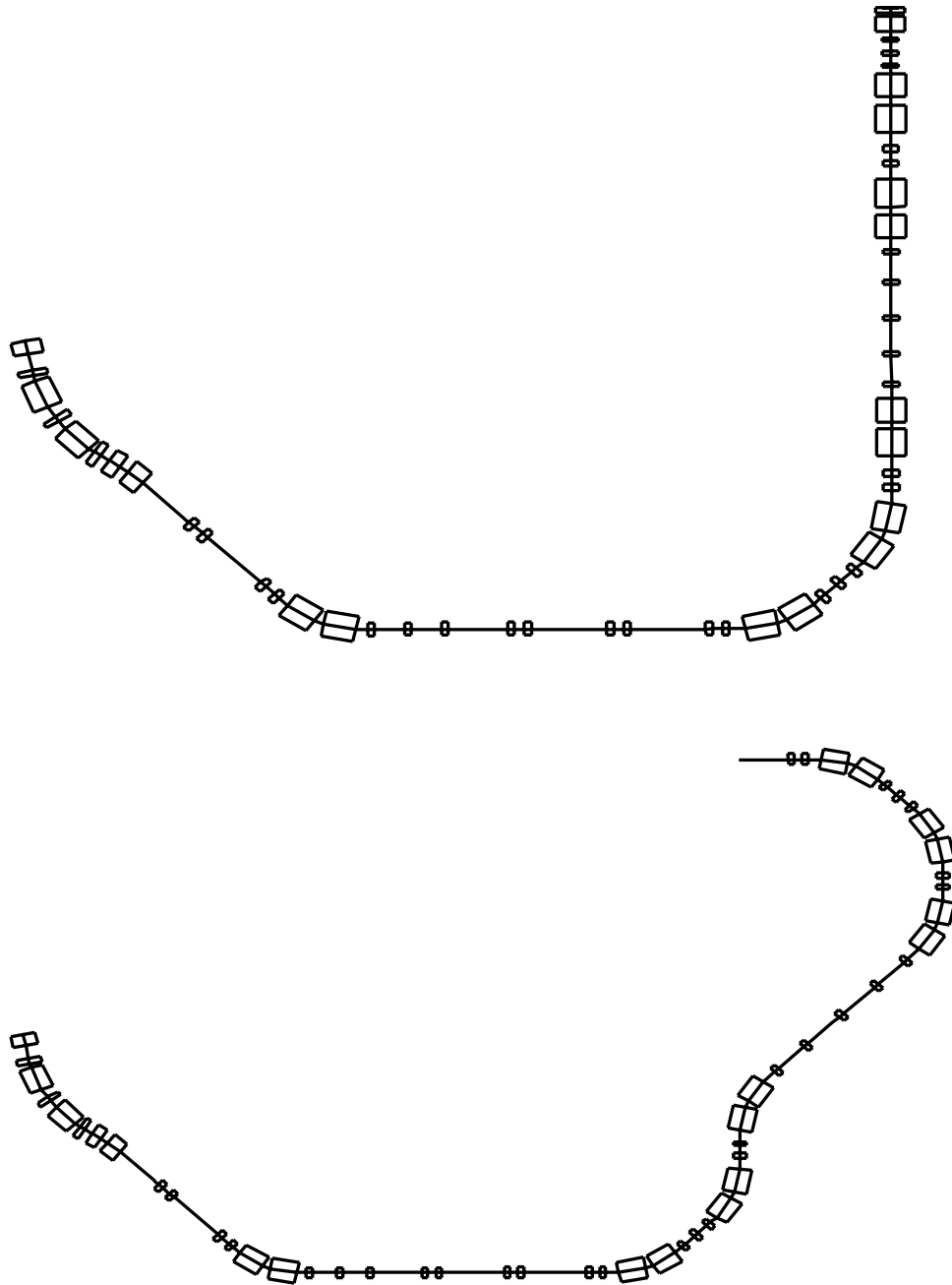


FIG. 27 – Ensemble extraction-ligne faisceau verticale, vues de dessus et projetée. Longueur 98.666 m.

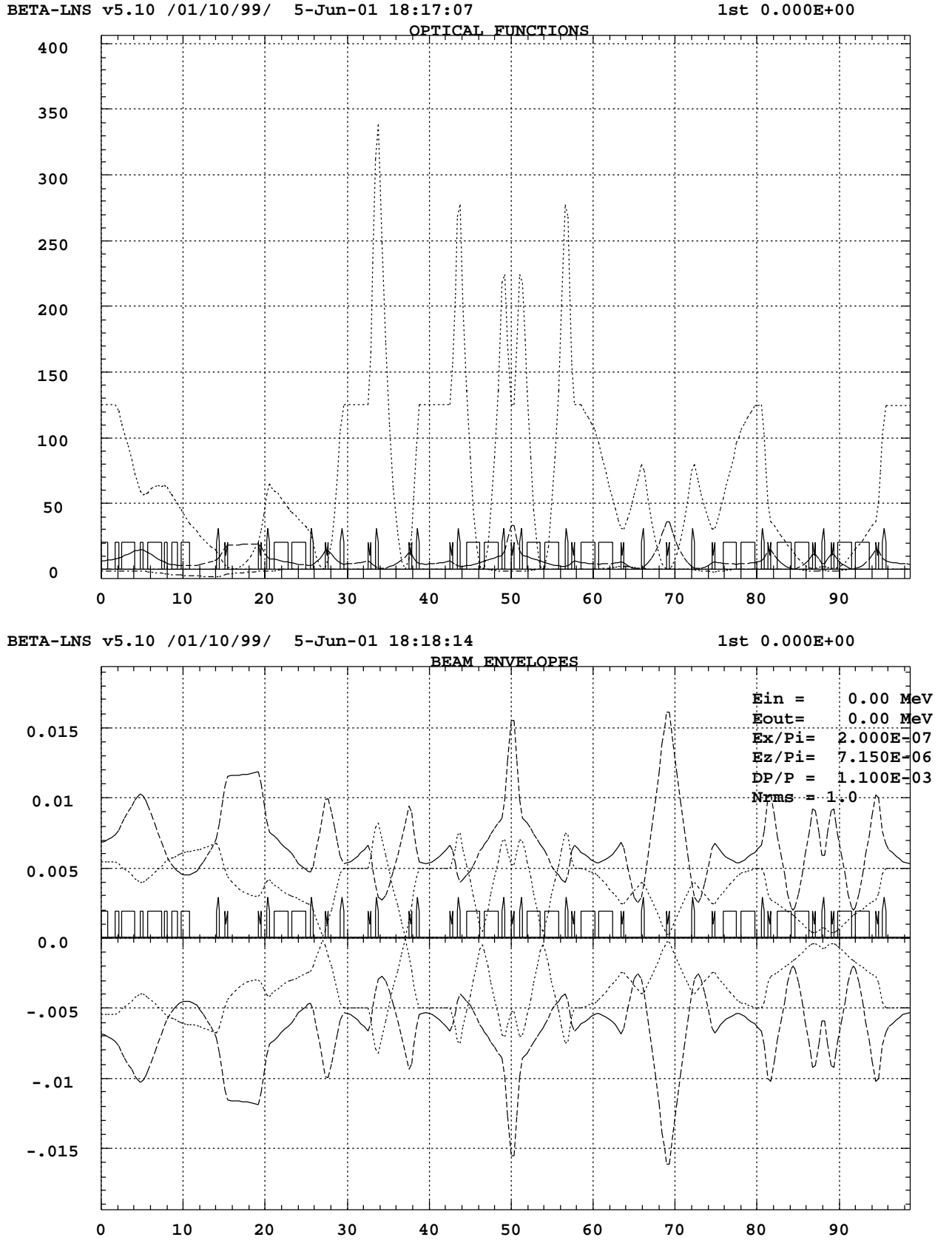


FIG. 28 – De l'extraction à la chambre faisceau vertical, via un (unique) module FODO. Enveloppes obtenues pour  $\epsilon_x/\pi = 0.2 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\epsilon_z/\pi = 7.15 \cdot 10^{-6}$  m.rad,  $\delta p/p = 1.1 \cdot 10^{-3}$ , réglage optique au diamètre 10 mm à la cible.



## 8 Arrêt faisceau

PIMMS propose un “beam chopper” (dispositif d’arrêt automatique du faisceau) installé dans une section droite libre *ad hoc* de longueur 6 mètres [2, PartII, Fig.5.6, p.126]. Cette structure peut être implantée dans notre design, cependant le système peut être rendu moins encombrant en l’intégrant à la première déviation située dans la “ligne d’extraction” (tq. décrite en Section 2.2, p. 10) moyennant un allongement de 0.9 m de la distance entre les deux dipôles principaux, comme montré en Fig. 29.

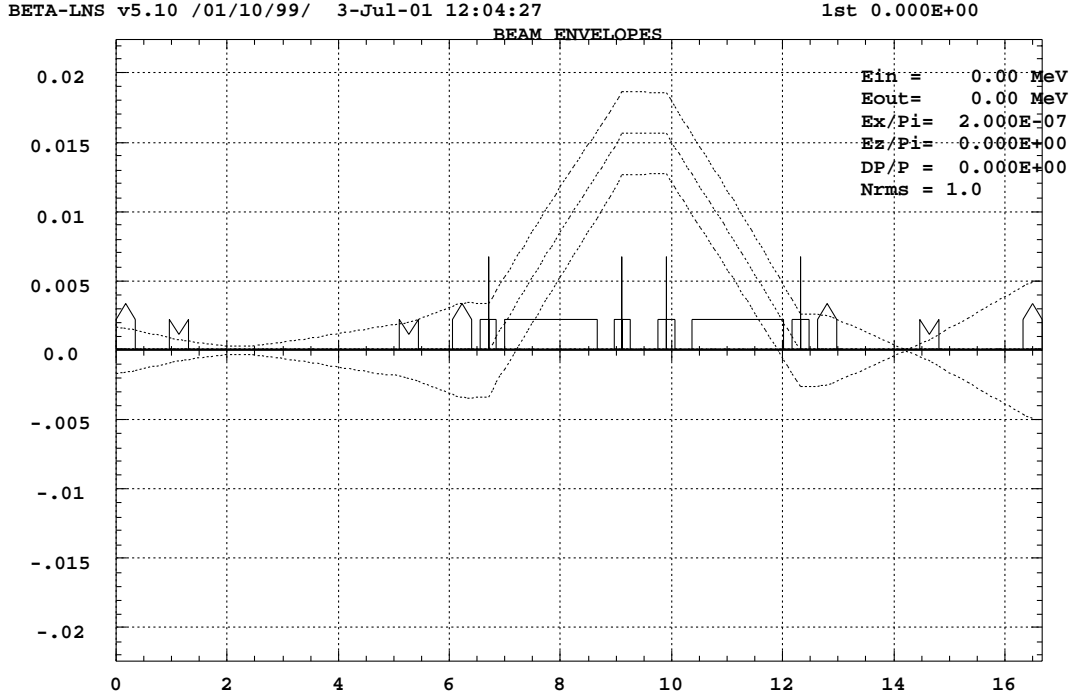


FIG. 29 – Dispositif d’arrêt du faisceau à quatre dipôles (6.6 mrad par dipôle), intégré à la première déviation à 45 degrés. Optique correspondant aux enveloppes maximales.

### *Kick du faisceau*

Deux variantes d’un design plus simple, demandant moins de place et en principe un unique dipôle rapide du type PIMMS (longueur magnétique 30 cm, déviation 6.6 mrad [2, PartII, App.II Z, p.309]) sont décrites en Fig. 30 dans le cas de la ligne d’extraction à 45 degrés (cf. Fig. 6). L’inconvénient de cette configuration est qu’elle induit un déplacement à la cible en cas de déclenchement.

Par sécurité on a doublé le dipôle rapide, ces deux dipôles participent donc (de l’ordre d’un degré) à la déviation horizontale. L’arrêt (en réaction à un incident) de l’un des deux au moins a pour effet de kicker le faisceau vers l’extérieur de la ligne. La distance faisceau-axe optique ainsi atteinte en aval de la déviation se doit d’être suffisamment importante pour permettre la présence permanente d’un bloc d’arrêt.

Le bon fonctionnement du dispositif requiert que le faisceau éjecté se trouve à environ 15 mm de l’axe (i.e., demi-largeur horizontale maximale du faisceau à cet endroit + garde de 10 mm), juste en aval de la déviation, où le bloc d’arrêt peut être installé. Remarque : la

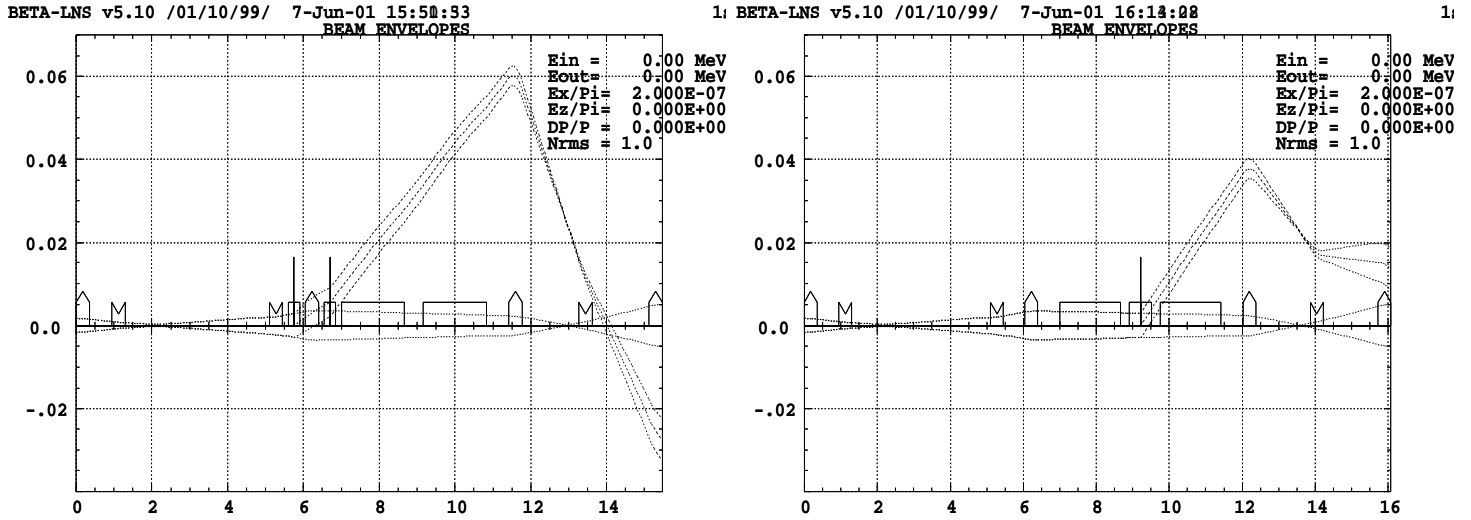


FIG. 30 – Dispositif d’arrêt du faisceau. Les dipôles rapides peuvent être placés en amont de la déviation, ou bien entre les deux dipôles dans le cas de la déviation à 45 degrés. La contribution d’un dipôle rapide est prise ici égale à 6.6 mrad. Optique correspondant aux enveloppes maximales.

Fig. 30 montre que dans le cas de l’implantation entre les deux dipôles principaux la déflexion de 6.6 mrad par dipôle est un peu juste (l’action d’un seul des deux dipôles ne suffirait pas à kicker suffisamment le faisceau hors-axe), ce qui a priori imposerait d’augmenter leur force d’environ 30%.

## 9 Zone utile dans les éléments optiques

La “zone utile” définit l’étendue transverse nécessaire à la circulation du faisceau<sup>3</sup>, elle est donnée par (en utilisant les notations de l’Eq. 1 p. 20)

$$\begin{aligned} \text{Zone utile} &= 2 \times (\text{rayon du faisceau} + \text{guidage}) \\ &= 2 \times \left( \sqrt{\beta_y \epsilon_y / \pi} + |D_y \delta p / p| + \text{guidage} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

où  $\sqrt{\beta_y \epsilon_y / \pi}$  est le rayon d’enveloppe bêtatron hors-tout,  $\delta p / p$  est l’écart maximal en moment, “guidage” est une tolérance sur l’écart du centre de gravité du faisceau par rapport à l’axe optique.

Note : la valeur d’entrefer des dipôles ainsi que le diamètre de gorge des quadrupôles s’en déduisent en tenant compte de l’épaisseur de chambre à vide.

### Rayon du faisceau

La demi-dimension transverse maximale du faisceau dans chaque plan à l’intérieur des éléments optiques est répertoriée dans les Tables 2 (ligne d’extraction à 45 degrés), 3 (module de déviation 90 degrés, horizontal), 4 (module de déviation 90 degrés, vertical), 5 (module

<sup>3</sup>i.e., par voie de conséquence, l’étendue à l’intérieur de laquelle est imposée la limite de précision sur le champ dans les dipôles ( $\Delta B / B < 5 \cdot 10^{-4}$ ), et de précision sur le gradient intégré dans les quadrupôles ( $\Delta K L / K L < 10^{-3}$ ).

FODO), 6 (ligne faisceau verticale), telle que déduite des conditions de réglage optique (pour  $\phi : 4 \rightarrow 10$  mm, diamètre à la cible) donnant l'extremum local de la fonction  $\beta(s)$ , et à énergie d'extraction minimale (qui correspond à l'émittance maximale). Concernant cette dernière on se réfère aux données PIMMS [2, PartII,Tab.1.2,p.4], soit 60 MeV en proton, 120 MeV en Carbone ; à noter cependant que le cahier des charges du projet Rhône-Alpes préconise 50 MeV en proton et 85 MeV en Carbone, il convient en toute rigueur dans le cas où ces valeurs doivent être prises en compte d'augmenter de 10% le "diamètre faisceau" dans le calcul de la zone utile.

L'analyse des Tables 2-6 donne ainsi, pour valeurs de rayon faisceau maximal :

- (i) dans les dipôles, direction orthogonale à  $\vec{B}$  : 14.4 mm ;
- (ii) dans les dipôles, direction parallèle à  $\vec{B}$  (entrefer) : 9.7 mm ;
- (iii) dans les quadrupôles : 19 mm.

En prenant une marge de "guidage" de 10 mm, il résulte de ce qui précède que

la valeur maximale de la zone utile est de

- (i)  $2 \times (14.4 + 10) = 49$  mm dans le plan orthogonal à  $\vec{B}$  dans les dipôles,
- (ii)  $2 \times (9.7 + 10) = 40$  mm dans le plan parallèle à  $\vec{B}$  dans les dipôles,
- (iii)  $2 \times (19 + 10) = 58$  mm dans les quadrupôles.

On relève au passage que si l'on retient la valeur de diamètre de gorge de 80 mm (cas du quadrupôle des lignes faisceau de PIMMS [2, PartII,Tab.VI,p.293]) le faisceau occupe au maximum 50% de l'ouverture ce qui est conservatif.

# A Fichiers optiques

## A.1 Ligne d'extraction, version A

```

*** VERSION ***
BETA-LNS v5.10 /01/10/99/
*** TITRE ***
Pimms, extractionLine
*** LIST OF ELEMENTS ***
51
REFPTD OB
ESMR360 DI 0.250012E-02 0.319984E+03 0.000000E+00 0.000000E+00
ESMR36D CO 0.250125E-02 0.319984E+03 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR362 SD 0.950004E+00
QFMR36C CO -.292675E-02 -.729766E+02 0.489415E-01 0.000000E+00 0.000000E+00
QFMR36 DI -.479606E-02 -.729766E+02 -.167080E+04 0.000000E+00
QFMR36D CO -.186931E-02 -.729766E+02 0.489415E-01 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR37 SD 0.370545E+00
MBMR37C CO -.194480E+00 -.422760E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR37 DI -.392898E+00 -.422760E+01 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR37D CO -.194842E+00 -.422760E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR38 SD 0.669912E+00
QDMR38C CO 0.206822E-02 0.495352E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
QDMR38 DI 0.706571E-02 0.495352E+02 0.128786E+04 0.000000E+00
QDMR38D CO 0.499749E-02 0.495352E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR39 SD 0.570305E+00
MBMR39C CO -.201347E+00 -.422764E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR39 DI -.392898E+00 -.422764E+01 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR39D CO -.191551E+00 -.422764E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR40 SD 0.341879E+00
QFMR40C CO -.479858E-02 -.615968E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
QFMR40 DI -.568213E-02 -.615968E+02 -.119003E+04 0.000000E+00
QFMR40D CO -.883552E-03 -.615968E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR01 SD 0.481000E+00
SSMR02 SD 0.750000E-01
MSMR01C CO 0.131004E-02 0.130000E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MSMR01 DI 0.500000E-01 0.130000E+02 0.000000E+00 0.000000E+00
MSMR01D CO 0.486900E-01 0.130000E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSEX01 SD 0.500000E+00
MSEX01 DI 0.150000E+00 0.666667E+01 0.000000E+00 0.000000E+00
MSEX01D CO 0.150000E+00 0.666667E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSEX02 SD 0.300000E+01
SVEX02 SD 0.150000E+00
QFA QP 0.350000E+00 0.135821E+01
SDAB SD 0.800000E+00
QFB QP 0.350000E+00 -.166276E+01
SDBC SD 0.380000E+01
QDC QP 0.350000E+00 -.781000E+00
SDCD SD 0.800000E+00
QFD QP 0.350000E+00 -.302360E+01
SDCHB SD 0.800000E+00
HBEX06 BH -.392700E+00 -.422969E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 -.196350E+00
0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SF60 SD 0.600000E+00
QFE QP 0.350000E+00 0.220017E+01
SF35 SD 0.350000E+00
QFF QP 0.350000E+00 -.238608E+01
QFF1 QP 0.350000E+00 -.298968E+01
QFF2 QP 0.350000E+00 0.221874E+01
SF600 SD 0.600000E+01
SF130 SD 0.130000E+01
51 FA 0.100000E+01
*** STRUCTURE ***
53
REFPTD ESMR360 ESMR36D SSMR362 QFMR36C QFMR36 QFMR36D SSMR37 MBMR37C MBMR37
MBMR37D SSMR38 QDMR38C QDMR38 QDMR38D SSMR39 MBMR39C MBMR39 MBMR39D SSMR40
QFMR40C QFMR40D QFMR40D SSMR01 SSMR02 REFPTD MSMR01C MSMR01 MSMR01D SSEX01
MSEX01 MSEX01D SSEX02 SVEX02 SVEX02 QFA SDAB QFB SDBC QDC
SDCHB HBEX06 51 SF60 QFE SF60 QFF SF600 QFF1 SF35
QFF2 51 SF130
1
*** OPTION ***
BEAM
*** BEAM-MATRIX ***
1.25000E+02
0.00000E+00 8.00000E-03
0.00000E+00 0.00000E+00 6.52300E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 1.70800E-01 1.57776E-01
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

```

## A.2 Ligne d'extraction, version B

```

*** VERSION ***
BETA-LNS v5.10 /01/10/99/ 13-May-01 21:54:39
*** TITRE ***
Pimms, extractionLine
*** LIST OF ELEMENTS ***
50
REFPTD OB
ESMR360 DI 0.250012E-02 0.319984E+03 0.000000E+00 0.000000E+00

```

```

ESMR36D CO 0.250125E-02 0.319984E+03 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR362 SD 0.950004E+00
QFMR36C CO -.292675E-02 -.729766E+02 0.489415E-01 0.000000E+00 0.000000E+00
QFMR36 DI -.479606E-02 -.729766E+02 -.167080E+04 0.000000E+00
QFMR36D CO -.186931E-02 -.729766E+02 0.489415E-01 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR37 SD 0.370545E+00
MBMR37C CO -.194480E+00 -.422760E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR37 DI -.392898E+00 -.422760E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR37D CO -.194842E+00 -.422760E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR38 SD 0.669912E+00
QDMR38C CO 0.206822E-02 0.495352E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
QDMR38 DI 0.706571E-02 0.495352E+02 0.128786E+04 0.000000E+00
QDMR38D CO 0.499749E-02 0.495352E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR39 SD 0.570305E+00
MBMR39C CO -.201347E+00 -.422764E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR39 DI -.392898E+00 -.422764E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MBMR39D CO -.191551E+00 -.422764E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR40 SD 0.341879E+00
QFMR40C CO -.479858E-02 -.615968E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
QFMR40 DI -.568213E-02 -.615968E+02 -.119003E+04 0.000000E+00
QFMR40D CO -.883552E-03 -.615968E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSMR01 SD 0.481000E+00
SSMR02 SD 0.750000E-01
MSMR01C CO 0.131004E-02 0.130000E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MSMR01 DI 0.500000E-01 0.130000E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
MSMR01D CO 0.486900E-01 0.130000E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSEX01 SD 0.500000E+00
MSEX01 DI 0.150000E+00 0.666667E+01 0.000000E+00 0.000000E+00
MSEX01D CO 0.150000E+00 0.666667E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SSEX021 SD 0.300000E+01
SVEX021 SD 0.150000E+00
QFA QP 0.350000E+00 0.117222E+01
SDAB SD 0.600000E+00
QFB QP 0.350000E+00 -.111730E+01
SDBC SD 0.380000E+01
QDC QP 0.350000E+00 -.114717E+01
SDCD SD 0.600000E+00
QFD QP 0.350000E+00 0.146073E+01
SDCHB SD 0.600000E+00
HBEX06 BH -.392699E+00 -.422970E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 -.196350E+00
0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SF60 SD 0.600000E+00
QFE QP 0.350000E+00 0.187171E+01
SF35 SD 0.350000E+00
QFF QP 0.350000E+00 -.172407E+01
QFF1 QP 0.350000E+00 0.131836E+01
SF150 SD 0.150000E+01
49 FA 0.100000E+01
SF50 SD 0.500000E+00
*** STRUCTURE ***
53
REFPTD ESMR360 ESMR36D SSMR362 QFMR36C QFMR36 QFMR36D SSMR37 MBMR37C MBMR37
MBMR37D SSMR38 QDMR38C QDMR38 QDMR38D SSMR39 MBMR39C MBMR39 MBMR39D SSMR40
QFMR40C QFMR40 QFMR40D SSMR01 SSMR02 REFPTD MSMR01C MSMR01 MSMR01D SSEX01
MSEX01 MSEX01D SSEX021 SVEX021 SVEX021 QFA SDAB QFB SDBC QDC
SDCD QFD SDCHB HBEX06 SF50 HBEX06 49 SF60 QFE SF150
QFF SF150 QFF1
1
*** OPTION ***
BEAM
*** BEAM-MATRIX ***
1.25000E+02
0.00000E+00 8.00000E-03
0.00000E+00 0.00000E+00 6.52300E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 1.70800E-01 1.57776E-01
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
*** DISPERSION ***
-1.942000E+00 2.500000E-02 ETAX0 , ETAXP0
0.000000E+00 0.000000E+00 ETAZ0 , ETAZP0
*** PARTICLE TYPE ***
E
*** ENERGIE CINETIQUE (MeV) ***
0.0000E+00
0.
*** PARAMETERS OF FIT ***
7
QFA 2 0 0.10000E-01
QFB 2 0 0.10000E-01
QDC 2 0 0.10000E-01
QFD 2 0 0.10000E-01
QFE 2 0 0.10000E-01
QFF 2 0 0.10000E-01
QFF1 2 0 0.10000E-01
9
0 3 3 39 0.20000E+02 0.20000E+02
6 2 0 48 0.00000E+00 0.10000E+00
6 1 0 48 0.00000E+00 0.10000E+00
6 2 0 53 0.00000E+00 0.10000E+00
6 1 0 53 0.00000E+00 0.10000E+00
0 4 3 53 0.00000E+00 0.10000E+00
0 1 1 53 0.12500E+03 0.40000E+01
0 2 1 53 0.00000E+00 0.10000E+00
0 3 3 53 0.40000E+01 0.50000E+00

```

### A.3 Module de déviation 90 degrés, horizontal

```

*** VERSION ***
BETA-LNS v5.10 /01/10/99/ 13-May-01 22:42:18
*** TITRE ***
PIMDev90
*** LIST OF ELEMENTS ***
11
SD1L SD 0.300000E+01
QP1L QP 0.350000E+00 -.188768E+01
SD2L SD 0.500000E+00
QP2L QP 0.350000E+00 0.235270E+01
SD3L SD 0.800000E+00
DIPL BH -.392699E+00 -.422970E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 -.196350E+00
      0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SD50 SD 0.500000E+00
SD4L SD 0.500000E+00
QP3L QP 0.350000E+00 0.212381E+01
SD5L SD 0.750000E+00
QP4L QP 0.350000E+00 -.265965E+01
*** STRUCTURE ***
23
SD1L QP1L SD2L QP2L SD3L DIPL SD50 DIPL SD4L QP3L
SD5L QP4L SD5L QP3L SD4L DIPL SD50 DIPL SD3L QP2L
SD2L QP1L SD1L
1
*** OPTION ***
BEAM
*** BEAM-MATRIX ***
1.25000E+02
0.00000E+00 8.00000E-03
0.00000E+00 0.00000E+00 4.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.50000E-01
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
*** DISPERSION ***
0.00000E+00 0.00000E+00 ETAX0 , ETAXP0
0.00000E+00 0.00000E+00 ETAZ0 , ETAZP0
*** PARTICLE TYPE ***
E
*** ENERGIE CINETIQUE (MeV) ***
0.0000E+00
0.511003017
*** PARAMETERS OF FIT ***
4
QP3L 2 0 0.10000E-01
QP2L 2 0 0.10000E-01
QP1L 2 0 0.10000E-01
QP4L 2 0 0.10000E-01
6
1 1 6 23 0.00000E+00 0.50000E-01
1 2 6 23 0.00000E+00 0.50000E-01
0 1 1 23 0.12500E+03 0.10000E+01
0 3 3 23 0.40000E+01 0.20000E+00
0 2 1 23 0.00000E+00 0.10000E+00
0 4 3 23 0.00000E+00 0.10000E+00

```

### A.4 Module FODO

```

*** VERSION ***
BETA-LNS v5.10 /01/10/99/
*** TITRE ***
FODO
*** LIST OF ELEMENTS ***
4
1 QP 0.350000E+00 0.235574E+01
2 SD 0.500000E+00
3 QP 0.350000E+00 -.235574E+01
4 SD 0.380000E+01
*** STRUCTURE ***
8
3 2 1 4 3 2 1 4
1
*** OPTION ***
BEAM
*** BEAM-MATRIX ***
1.25070E+02
2.37520E-02 8.00010E-03
0.00000E+00 0.00000E+00 6.20220E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 7.40950E-01 2.49750E-01
-3.16710E+00 -1.55160E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 1.10800E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
*** PARAMETERS OF FIT ***
2
1 2 0 0.00000E+00
3 2 0 0.00000E+00
2
2 1 0 4 0.25000E+00 0.10000E+01
2 3 0 4 0.25000E+00 0.10000E+01

```

## A.5 Ligne faisceau verticale

```

*** VERSION ***
BETA-LNS v5.10 /01/10/99/ 3-Jun-01 20:37:17
*** TITRE ***
PIMVertic
*** LIST OF ELEMENTS ***
25
SD1L SD 0.300000E+01
G11 QP 0.350000E+00 -.190439E+01
SD2L SD 0.500000E+00
G12 QP 0.350000E+00 0.236072E+01
SD3L SD 0.800000E+00
DIPL BH -.392699E+00 -.422970E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 -.196350E+00
0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SD50 SD 0.500000E+00
SD4L SD 0.500000E+00
G21 QP 0.350000E+00 0.212509E+01
SD5L SD 0.750000E+00
G22 QP 0.350000E+00 -.266518E+01
DIPVP BV 0.392699E+00 0.422970E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 0.196350E+00
0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SD55 SD 0.550000E+00
DIPVM BV -.392699E+00 -.422970E+01 0.000000E+00 0.000000E+00 -.196350E+00
0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
SS1 SD 0.100000E+01
G41 QP 0.350000E+00 -.181353E+01
G42 QP 0.350000E+00 0.168408E+01
SS2.25 SD 0.218286E+01
G43 QP 0.350000E+00 -.189413E+01
G44 QP 0.350000E+00 0.200600E+01
G45 QP 0.350000E+00 -.180430E+01
G51 QP 0.350000E+00 0.156871E+01
G52 QP 0.350000E+00 -.232862E+01
G61 QP 0.350000E+00 -.245283E+01
G62 QP 0.350000E+00 0.416247E+01
*** STRUCTURE ***
63
SD1L G11 SD2L G12 SD3L DIPL SD50 DIPL SD4L G21
SD5L G22 SD5L G21 SD4L DIPL SD50 DIPL SD3L G12
SD2L G11 SD3L DIPVP SD50 DIPVP SS1 G41 SS2.25 G42
SS2.25 G43 SS2.25 G42 SS2.25 G41 SS1 DIPVM SD50 DIPVM
SD3L G51 SD2L G52 SD3L DIPVM SD50 DIPVM SD50 G61
SD5L G62 SD5L G61 SD50 DIPVM SD50 DIPVM SD3L G52
SD50 G51 SD1L
1
*** OPTION ***
BEAM
*** BEAM-MATRIX ***
1.25000E+02
0.00000E+00 8.00000E-03
0.00000E+00 0.00000E+00 4.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.50000E-01
-3.10630E+00 -1.22990E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 1.10750E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
*** DISPERSION ***
0.00000E+00 0.00000E+00 ETAX0 , ETAXP0
0.00000E+00 0.00000E+00 ETAZ0 , ETAZP0
*** PARTICLE TYPE ***
E
*** ENERGIE CINETIQUE (MeV) ***
0.0000E+00
0.511003017
*** PARAMETERS OF FIT ***
3
G41 2 0 0.10000E-01
G42 2 0 0.10000E-01
G43 2 0 0.10000E-01
6
6 3 0 41 0.00000E+00 0.10000E+00
6 4 0 41 0.00000E+00 0.10000E+01
0 1 1 63 0.12500E+03 0.10000E+01
0 3 3 63 0.40000E+01 0.10000E+01
0 2 1 63 0.00000E+00 0.10000E+01
0 4 3 63 0.00000E+00 0.50000E+00

```

## B Scans des fonctions optiques

### B.1 Ligne d'extraction, version B - 45 degrés

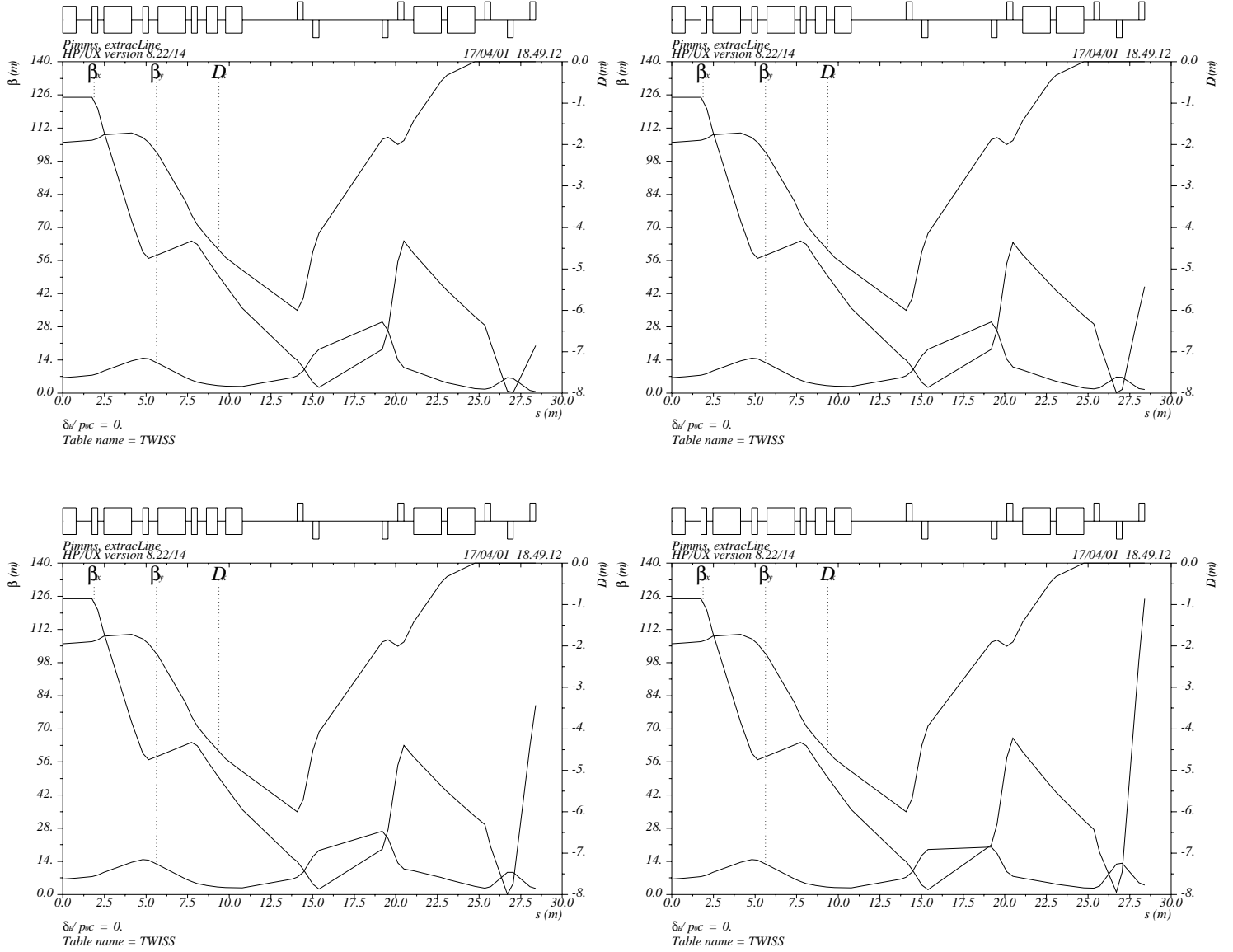


FIG. 31 – Section amont de la ligne d'extraction, version B - 45 degrés. Scan des fonctions optiques [3], le diamètre en extrémité de ligne varie de 4 à 10 mm par pas de 2 mm ici. L'évolution correspondante des forces des quadrupôles est donnée par pas de 1 mm en Fig. 9



## B.2 Module de déviation 90 degrés, horizontal

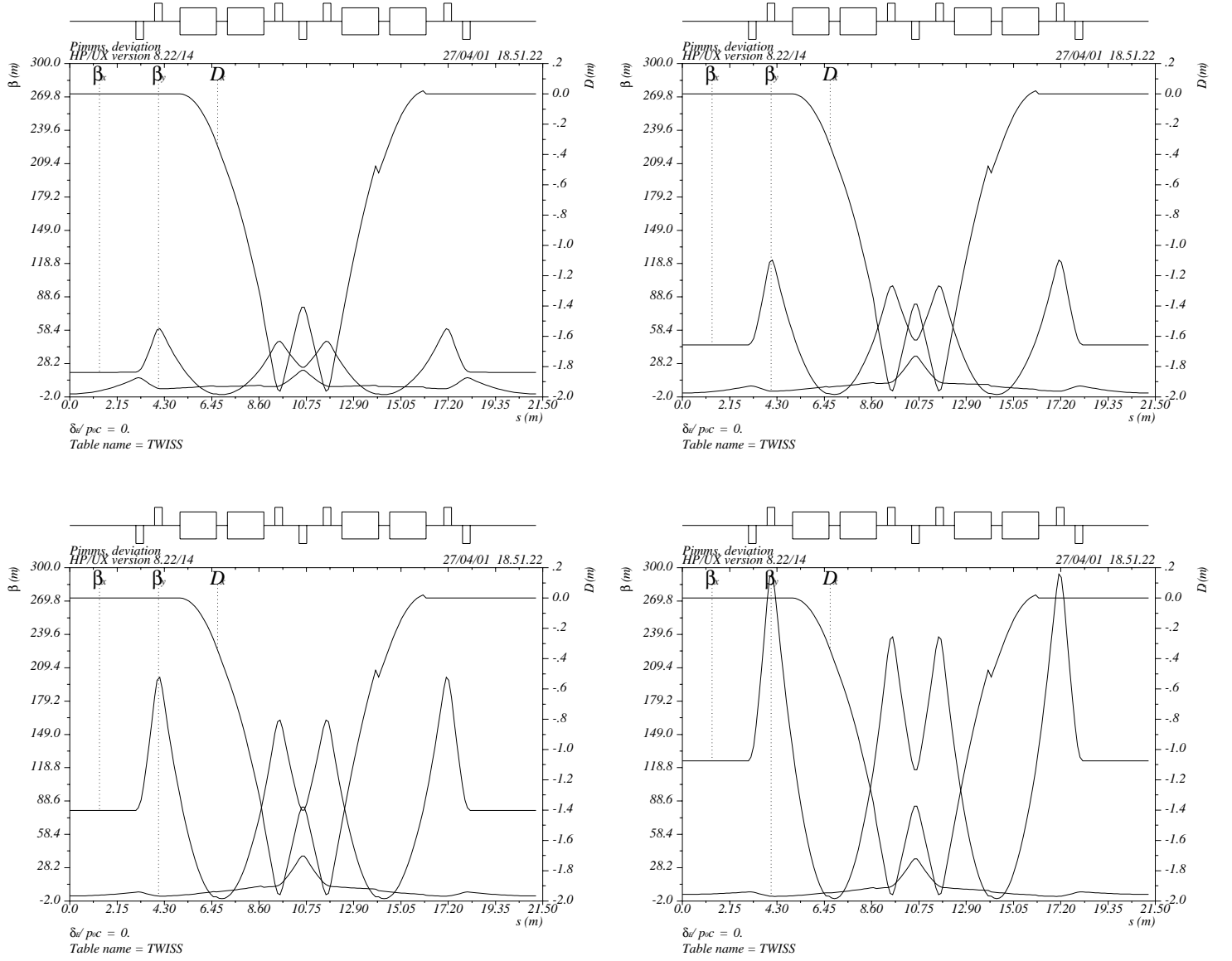


FIG. 32 – Module de déviation 90 degrés, horizontal. Scan des fonctions optiques, le diamètre en extrémité de ligne varie de 4 à 10 mm par pas de 2 mm ici. L'évolution correspondante des forces des quadrupôles est donnée par pas de 1 mm en Fig. 9

## Références

- [1] Projet d'un centre d'hadronthérapie par faisceaux d'ions carbone, Mise à jour janvier 2001, M. Bajard, J. P. Gérard, J. Remillieux, D. Sappey-Marinier, UCB-Lyon 1.
- [2] Proton-ion medical machine study, Part I, CERN/PS 99-010 (DI) March 1999 & Part II, CERN/PS 2000-007 (DR) May 2000.
- [3] Obtenus avec MAD, H. Grote, C. Iselin, [http ://mad.home.cern.ch/mad/](http://mad.home.cern.ch/mad/).